FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Controlo Avançado de Sistemas Híbridos de Armazenamento de Energia

Hélder João Loureiro Pereira

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Rui Esteves Araújo

22 de julho de 2020

© Hélder Pereira, 2020

Resumo

Embora as vendas dos veículos elétricos estejam em crescimento e sejam uma solução para mitigar a poluição resultante dos veículos de combustão interna, existem ainda obstáculos intrínsecos que estão a impedir a sua popularidade. Um destes obstáculos é as fragilidades do sistema de armazenamento de energia resultante do desequilíbrio entre as células. Com efeito, em que as que possuem menor capacidade ou pior desempenho atingem temperaturas superiores e/ou descarregam abaixo da região de operação segura. Outro aspeto, é o esforço aplicado nestas o qual resulta das correntes de pico inerentes a uma condução automóvel que exige momentos de aceleração ou de travagem regenerativa com elevados níveis de trânsito de potência sujeitando as células aos seus limites de operação. Estes obstáculos propiciam uma redução do ciclo de vida do sistema de armazenamento, o que é indesejável e merecedor de estudos.

Pretende-se com esta dissertação possibilitar o balanceamento da temperatura e do estado de carga e simultaneamente diminuir o esforço gerado nas baterias durante um ciclo de condução normal. Para isso, procura-se desenvolver um sistema de controlo avançado de sistemas híbridos de armazenamento de energia que combina as células típicas de lítio com supercondensadores (SC). Assim, é possivel conciliar as características complementares de ambos e aumentar o ciclo de vida do sistema de armazenamento e a autonomia de condução.

Nesta dissertação são inicialmente estudados os diferentes tipos de balanceamento e de hibridação de modo a perceber as suas vantagens e desvantagens e permitir uma compreensão detalhada do sistema físico já existente e que constitui uma plataforma basilar para esta dissertação. De seguida, são procurados métodos de estimação do SoC (estado de carga) que possibilitem manter um conhecimento preciso do estado de carga nos módulos. São também revistos vários tipos de controlo em tempo real, desde o controlo baseado em regras até ao controlo preditivo como possíveis metodologias a aplicar.

Com base estudo realizado, foi desenvolvido um modelo do sistema e um controlador preditivo que tem como objetivo minimizar as perdas no sistema, variações de temperatura e SoC entre células e simultaneamente diminuir o esforço provocado no sistema de armazenamento, tirando partido da hibridação usando SC. Finalmente, este controlador depois de calibrado e caracterizado é testado num protótipo em pequena escala com o intuito de o validar.

Palavras-chave: Balanceamento; MPC; Supercondensadores;

Abstract

Although electric vehicles are a growing solution to the environmental pollution resulting from vehicles based on internal combustion engines, there are inherent obstacles to their success. Some of the obstacles include the decay of the health of the energy storage system resulting from the imbalance between batteries cells. These imbalances make the performance of the battery pack dependent on the cells with with less capacity. Another aspect is the stress applied to the battery pack, particularly high current levels during fast acceleration transients. These events reduce the lifetime of the storage system, which is undesirable. This dissertation presents a control design that is able to balance the temperature and state of charge (SoC) of the battery pack, and simultaneously minimize the stress generated in the batteries during a normal driving cycle.

To this end, we seek to develop an advanced control system for hybrid energy storage systems that combines typical lithium cells with super-capacitors (SC) in order to conciliate their complementary characteristics and increase the life span of the storage system and the driving time. In this dissertation, different types of balancing and hybridization are studied in order to understand their advantages and disadvantages and to allow a detailed understanding of the state of the art. Then, estimation methods for predicting SoC are developed in order to accurately evaluate the energy available in the battery cells. Various types of real-time control are also considered, from rule-based control to predictive control. Based on what has been studied, a model of the system is then developed and a model predictive controller (MPC) is built that aims to minimize energy losses in the system, variations in temperature and SoC between cells and simultaneously decrease the battery stress taking advantage of the hybridization with SC.

Finally, the controller is carefully calibrated in simulation and experimentally validated in a small-scale prototype.

Keywords: Balancing; MPC; Supercapacitors;

Agradecimentos

Primeiramente, queria começar por agradecer ao meu orientador Professor Doutor Rui Araújo por todo o apoio que, em condições muito difíceis, permitiu realizar este trabalho. Queria também agradecer ao Doutor Engenheiro Ricardo Castro pelas ideias e sugestões que deram rumo à dissertação. Sem a orientação, conhecimento e motivação com que me presentearam, não teria sido possível obter estes resultados.

Estou também muito grato aos meus amigos que providenciaram momentos de descanso e diversão mesmo quando o ambiente era de cansaço, como os jantares onde os problemas desapareciam ou na faculdade onde a conversa distanciava as dificuldades que se aproximavam. A todos eles desejo o melhor e espero que o tempo não nos separe. Um agradecimento especial ao Pedro Filipe, sem a sua motivação e exemplo desde o secundário não estaria hoje a escrever esta dissertação.

À Maria de Fonseca agradeço a paciência, o carinho, o ânimo e muito mais que me ajudou a terminar uma fase muito importante da minha vida. Esteve sempre lá para mim e ajudou-me a perceber que o céu é o limite.

Aos meus pais agradeço esta oportunidade que, com muito esforço e dedicação, me conseguiram proporcionar. Guiaram-me durante as várias etapas da vida dando-me sempre a possibilidade de escolher e experimentar.

A todos, os meus melhores agradecimentos, o suporte que me providenciam todos os dias dá-me forças para enfrentar todos os obstáculos.

Hélder Pereira

"Failure will never overtake me if my determination to succeed is strong enough."

Og Mandino

Conteúdo

1 Introdução **1**
- 1.1 Contexto e Motivação . . . 1
- 1.2 Objetivos . . . 2
- 1.3 Estrutura do Documento . . . 4

2 Revisão Bibliográfica **5**
- 2.1 Sistema de armazenamento de energia híbrido . . . 5
- 2.2 Conceitos de Hibridação . . . 5
  - 2.2.1 Zero graus de liberdade . . . 6
  - 2.2.2 Um grau de liberdade . . . 6
  - 2.2.3 Dois graus de liberdade . . . 7
- 2.3 Balanceamento do Sistema de Armazenamento de Energia . . . 7
- 2.4 Controlo do Balanceamento e Gestão de Energia . . . 9
  - 2.4.1 Controlo baseado em regras . . . 9
  - 2.4.2 Controlo ótimo . . . 12
- 2.5 Estimação do SoC das baterias . . . 14
  - 2.5.1 Tensão em Circuito Aberto . . . 14
  - 2.5.2 Modelo de Bateria . . . 14
  - 2.5.3 Contagem de Coulomb . . . 15
- 2.6 Conclusões . . . 16

3 Modelação do sistema híbrido de armazenamento de energia **19**
- 3.1 Modelo . . . 19
  - 3.1.1 Modelação . . . 20
  - 3.1.2 Função objetivo . . . 22
  - 3.1.3 Cálculo da trajectória de referência . . . 23
- 3.2 Plataforma computacional *GEKKO* . . . 26
  - 3.2.1 Plataforma . . . 26
- 3.3 Conclusão . . . 27

4 Simulação Computacional **29**
- 4.1 Simulador . . . 29
  - 4.1.1 Métricas de desempenho . . . 30
  - 4.1.2 Relação entre as métricas de desempenho . . . 31
- 4.2 Testes de desempenho . . . 35
  - 4.2.1 Resultados sem hibridação . . . 35
  - 4.2.2 Resultados com hibridação . . . 40
  - 4.2.3 Comparação entre sistema híbrido e não híbrido . . . 45

4.2.4 Grau de hibridação 45
4.2.5 Eficiência dos conversores 47
4.2.6 Tempos de simulação 48
4.3 Conclusão 49

5 Ensaios experimentais **51**
5.1 Plataforma de testes 51
5.2 Caracterização das células 53
5.2.1 Caraterísticas térmicas das células 55
5.3 Estimação do SoC 55
5.4 Resultados experimentais do controlador MPC no Plataforma de testes 58
5.4.1 Parâmetros 61
5.4.2 Resultados 61

6 Conclusões e Trabalho Futuro **69**
6.1 Conclusão 69
6.2 Trabalho Futuro 70

Referências **71**

A Gráficos completos dos testes de simulação sem hibridação **75**

B Gráficos completos dos testes de simulação com hibridação **79**

C Gráficos completos dos testes na plataforma de testes **83**

D Implementação em Python do MPC **87**

Lista de Figuras

1.1 Cenário previsto em EV30@30 para o *stock* de veículos elétricos para 2018-2030. 2
1.2 Diagrama de blocos do sistema híbrido de armazenamento de energia. Onde $j = 1,...,n$ e n é o número de módulos no sistema. 3

2.1 Topologias de hibridação. a) Topologia passiva. b) Topologia ativa SC/bateria com 1D. c) Topologia ativa Bateria/SC com 1D. d) Topologia ativa com dois graus de liberdade. e) Topologia ativa com conversor *multi-input*. 7
2.2 Topologias de balanceamento. 8
2.3 Topologia de balanceamento *Cell-To-Cell Shared* com um grau de liberdade. . . 9
2.4 Árvore de estratégias de controlo. 10
2.5 Fluxograma lógico de controlo. 10
2.6 Fluxograma do balanceamento da tensão durante o carregamento. 11
2.7 Estrutura de um controlador Fuzzy. 12
2.8 Exemplo de um horizonte de predição. 13
2.9 Estrutura básica de um MPC. 13
2.10 Esquema de controlo. 14
2.11 Relação OCV-SOC de várias baterias idênticas. 15
2.12 Modelo dinâmico de uma bateria. 15
2.13 Variação da impedância interna de uma bateria em função do SoC. 16

3.1 Modelo elétrico do sistema para n=3. 20
3.2 Circuito elétrico equivalente da resposta térmica do módulo de baterias. 20
3.3 Exemplo de geração da trajetória do estado de carga do módulo #1 e a sua corrente de balanceamento prevista. Com N=44 e T_s=0.5. 25
3.4 *Setpoint* dos supercondensadores em função do valor médio do SoC. 25

4.1 Diagrama de blocos do sistema completo a simular, com o controlador MPC, uma carga que emula o sistema de tração do veículo e um simulador do sistema híbrido de armazenamento de energia. 29
4.2 *Driving-Cycle* US06 escalado para ser compatível com a plataforma de testes. . . 30
4.3 Relação entre pesos e os seus resultados normalizados. P=[α_q, α_T, α_s, α_l]. 33
4.4 Relação entre os pesos α_q, α_T e α_s e os seus resultados normalizados. Para [α_q, α_T, α_s, α_l]: P_1=[1,0,0,0]; P_2=[0,1,0,0];P_3=[0.5,0.5,1,0]; P_4=[0,0,1,0]. 34
4.5 Relação entre os pesos α_q, α_T e α_l e os seus resultados normalizados. Para [α_q, α_T, α_s, α_l]: P_1=[1,0,0,0]; P_2=[0,1,0,0];P_3=[0,0,0,1]. 34
4.6 Simulação de balanceamento de estado de carga sem hibridação. Ampliado para $t \in [0,400]$. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0]. 36
4.7 Simulação de balanceamento de temperatura ampliado para $t \in [0,400]$ sem hibridação. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0]. 37

4.8 Ampliação do teste de minimização das perdas totais no sistema para $t \in [0,400]$ sem hibridação. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,0,1]. 38
4.9 Gráficos de radar dos resultados sem hibridação obtidos na tabela 4.4 normalizados entre si. O valor 1 corresponde ao melhor desempenho obtido e o valor 0 ao pior. 40
4.10 Simulação de balanceamento de estado de carga com hibridação ampliado para $t \in [0,400]$. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0]. 41
4.11 Simulação de balanceamento de temperatura ampliado para $t \in [0,400]$ com hibridação. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0]. 42
4.12 Ampliação do teste de minimização do esforço na célula #1 com hibridação. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,1,0]. 42
4.13 Ampliação do teste de minimização das perdas totais no sistema com hibridação para $t \in [1170,1185]$. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,0,1]. 43
4.14 Gráfico de radar dos resultados com hibridação da tabela 4.5, normalizados entre si. O valor 1 corresponde ao melhor desempenho obtido e o valor 0 ao pior. . . . 45
4.15 Consequência do rácio de hibridação (γ) na temperatura máxima, no estado de carga mínimo, no esforço nas células e nas perdas totais do sistema em cada para seis ciclos de condução. Com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1.0,0.0,0.0,0.0] nos dois gráficos do topo e [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.0,0.0,0.0,1.0] nos gráficos inferiores. 46
4.16 Consequência do valor do modelo de perdas R_B dos conversores na temperatura máxima obtida em cada simulação, no estado de carga mínimo obtido, no esforço nas células e nas perdas totais do sistema. Com controlo: [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0.5,0.5]. Só balanceamento: [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.0,0.5,0.5,0.0]. . . . 47
4.17 Consequência do valor do modelo de perdas (R_B) dos conversores no balanceamento da temperatura e do estado de carga. Com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0.5,0.5] 48

5.1 Diagrama de blocos do protótipo em pequena escala. Constituído por três módulos de baterias. 52
5.2 Protótipo em pequena escala do sistema híbrido de armazenamento de energia. . 52
5.3 Módulo de baterias do protótipo em pequena escala. Constituído por 10 células divididas em 3 módulos. 53
5.4 Modelo dinâmico simplificado de uma bateria 53
5.5 Ciclo de descarregamento efectuado para caracterizar as células. 54
5.6 Ampliação do ciclo de descarregamento efectuado para caracterizar as células. Onde V_a é a tensão no instante imediatamente antes da carga ser desligada e V_b é no instante seguinte. 54
5.7 Temperatura medida nos módulos para seis ciclos de condução e a temperatura calculada pelo modelo térmico. 56
5.8 Curva OCV-SoC de uma célula (LG 18650HG2). 57
5.9 Diagrama de fluxo do algoritmo de estimação do estado de carga e carga nominal do módulo. 59
5.10 Teste de calibração. Estado de carga estimado pelo sistema e o que seria esperado obter, antes e depois da calibração no instante $t = 3000$. 60
5.11 *Driving-Cycle* US06 escalado para ser compatível com o Plataforma de testes e o *Hardware* disponível. 60
5.12 Resultados na plataforma de testes sem balanceamento e sem minimização. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,0,0]. 63
5.13 Resultados de balanceamento de estado de carga ampliado para $t \in [0,400]$. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0]. 64

5.14 Resultados de balanceamento de temperatura ampliado para $t \in [0,400]$. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0]. 65
5.15 Resultados de minimização de esforço na célula #1 ampliado para $t \in [1938,2015]$. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,1,0]. 66
5.16 Todos os gráfico de radar dos resultados obtidos para os pesos definidos na tabela 4.3 combinados. O valor 1 corresponde ao melhor desempenho obtido e o valor 0 ao pior. 66

A.1 Resultados para seis ciclos de condução sem hibridação. a) Sem balanceamento e minimização. b) Balanceamento do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0] c) Balanceamento da temperatura com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0]. 76
A.2 Resultados para seis ciclos de condução sem hibridação. a) Balanceamento da temperatura e do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0,0]. b) Minimização do stress com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,1,0]. c) Minimização das perdas com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,0,1]. 77
A.3 Resultados para seis ciclos de condução sem hibridação. Simulação com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0.5,0.5] 78

B.1 Resultados para seis ciclos de condução. a) Sem balanceamento e minimização. b) Balanceamento do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0] c) Balanceamento da temperatura com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0]. 80
B.2 Resultados para seis ciclos de condução. a) Balanceamento da temperatura e do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0,0]. b) Minimização do stress com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,1,0]. c) Minimização das perdas com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,0,1]. . . 81
B.3 Resultados para seis ciclos de condução. Simulação com [α_q, α_T, α_s, α_l] = [0.5,0.5,0.5,0.5] 82

C.1 Resultados para seis ciclos de condução. a) Sem balanceamento e minimização. b) Balanceamento do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0] c) Balanceamento da temperatura com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0]. 84
C.2 Resultados para seis ciclos de condução. a) Balanceamento de SoC e temperatura com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0.5,0.5,0] b) Minimização do esforço. [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,1,0] c) Balanceamento e minimização [α_q, α_T, α_s, α_l] =[0.5,0.5,0.5,0.5]. 85

Lista de Tabelas

2.1 Características típicas de baterias e SC. 6

3.1 Valores de normalização da função de custo. 24
3.2 Modelação do sistema de armazenamento 27

4.1 Parâmetros do sistema usados na plataforma de simulação e no MPC. 31
4.2 Definição das métricas de desempenho. 32
4.3 Pesos definidos a serem usados nos testes das simulações. 35
4.4 Métricas de desempenho para os testes definidos na tabela 4.3 sem hibridação. Os valores a azul correspondem aos melhores valores nessa métrica nesta tabela. . . 39
4.5 Métricas de desempenho para os testes definidos na tabela 4.3. Os valores a azul correspondem aos melhores valores nessa métrica nesta tabela. 44
4.6 Métricas de desempenho para o sistema sem hibridação e com hibridação. Os valores a azul correspondem aos melhores valores nessa métrica nesta tabela. . . 46
4.7 Desempenho do controlador em função da dimensão do horizonte de tempo no Raspberry Pi 4 B para um ciclo de condução. 48

5.1 Parâmetros elétricos e térmicos das células 56
5.2 Estado de carga para diferentes valores de OCV. 57
5.3 Pesos usados nos testes na plataforma de testes. 61
5.4 Parâmetros elétricos e térmicos do sistema usados nos testes na plataforma de testes. 62
5.5 Métricas de desempenho para os testes definidos na tabela 5.3 e realizados na plataforma de testes. Os valores a azul correspondem aos melhores valores nessa métrica nesta tabela. 67

Abreviaturas

SC	*Super-capacitors* (Supercondensadores)
VE	Veículos elétricos
SoC	*State of charge* (Estado de carga)
OCV	*Open-circuit voltage* (Tensão em circuito aberto)
MPC	*Model predictive control* (Modelo de controlo preditivo)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e Motivação

Atualmente o setor de transporte possui uma grande dependência por combustíveis fósseis [1], o qual deve ser combatido pois alguns estudos afirmam que as matérias primas usadas para o abastecimento dos veículos podem desaparecer num futuro próximo [2]. Acresce que, é também considerado um dos maiores contribuidores para a emissão de gases de efeito de estufa [1]. Estes problemas têm levado os veículos elétricos (VE) a serem alvo de atenção nos últimos anos, provocando, consequentemente, um forte desenvolvimento pelos fabricantes automóveis na última década, bem como um interesse crescente por parte dos consumidores: em 2018 existiam globalmente 5.1 milhões de VE nas estradas, mais dois milhões que no ano anterior e é verificável na figura 1.1 que é uma tendência crescente [3, 4, 5, 6].

No cenário previsto em EV30@30 [6] os VE em 2030 serão responsáveis por mais de metade das vendas de veículos na Europa. No entanto, os sistemas de armazenamento dos VE possuem características que os tornam pouco apelativos, como a baixa densidade de energia que limita a autonomia do veículo e a reduzida densidade de potência que condiciona os diferentes regimes agressivos associados a uma utilização do veículo em condições típicas de condução, tais como a aceleração em manobras de ultrapassagem e a travagem regenerativa em situações de emergência. Sendo então necessário a introdução de elementos de armazenamento com características complementares que permitem suportar estes regimes, os SC [7, 8, 9]. Um outro problema associado às baterias é a montagem em série das células que faz com que o desempenho fique limitado ao elemento mais frágil dessa série - provocando um desequilíbrio no sistema de armazenamento. O equilíbrio é essencial, visto que as variações entre cada célula (capacidade nominal, tensão nominal, impedância, etc) originam problemas de sobre-carregamento/sobre-descarregamento e sobre-aquecimento o que, por sua vez, intensifica a sua degradação levando a uma possível falha completa [10]. Desta forma, é então vantajoso para muitos cenários de operação de sistemas de armazenamento de energia elétrica a combinação de fontes de energia com características complementares, em que um sistema de controlo é capaz de fazer a combinação das fontes de energia com o intuito de aproveitar melhor as suas caraterísticas. O balanceamento do SoC (estado de carga)

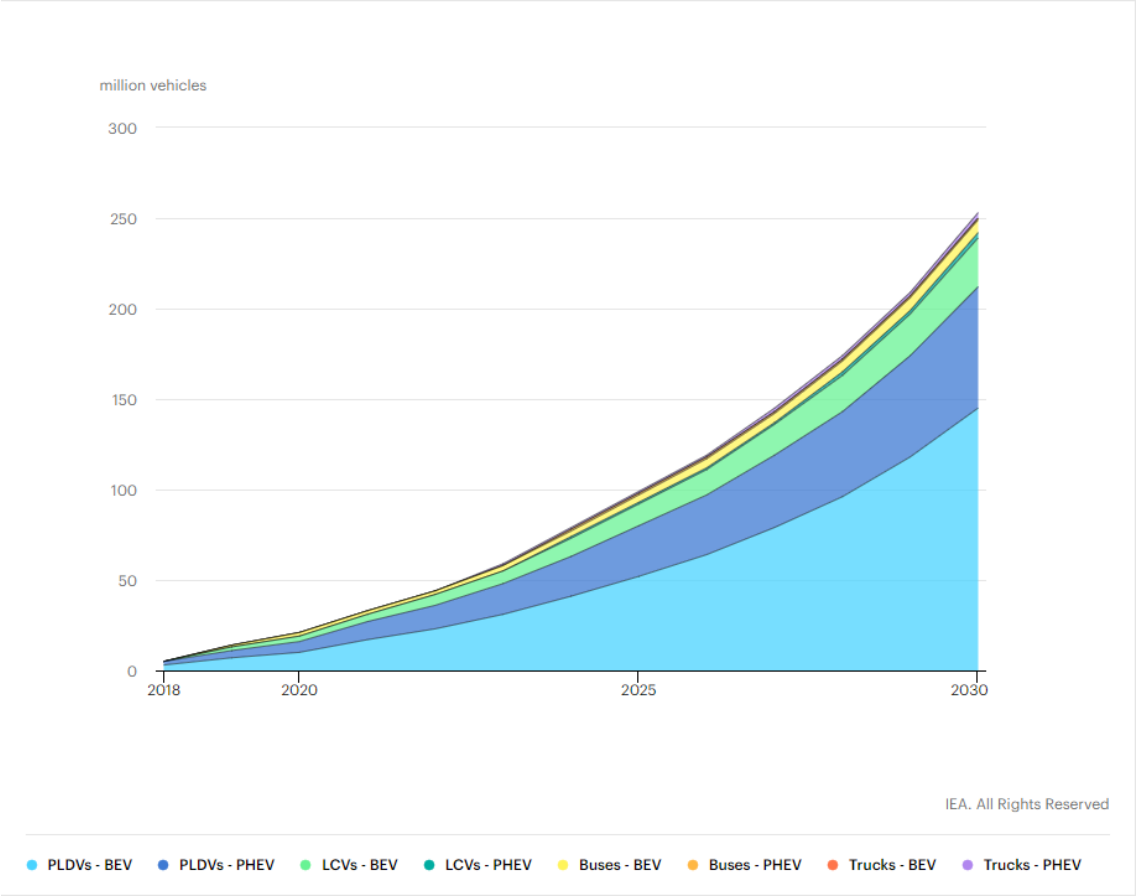


Figura 1.1: Cenário previsto em EV30@30 para o stock de veículos elétricos para 2018-2030 [5]. PLDV: Veículo ligeiro de passageiros, LCV: Veiculo ligeiro comercial, BEV: Veiculo elétrico de baterias, PHEV: Veiculo híbrido *Plug-in*.

e temperatura é também vantajoso, e uma metodologia que simultaneamente garante o balanceamento do SoC e de temperatura irá contribuir para aumentar o ciclo de vida e a sua eficiência [8, 9].

O problema de balanceamento de um sistema de armazenamento de energia híbrido é por si só um desafio que tem motivado muitas investigações, particularmente na última década. Não obstante o esforço despendido, o desafio continua ativo e a presente dissertação procura dar o seu contributo para o encontrar de soluções deliberadas.

1.2 Objetivos

Face ao problema, sentiu-se a necessidade de investigar a possibilidade de estabelecimento de um método de balanceamento vocacionado para a execução em tempo real. O principal objetivo que se pretende alcançar consiste em encontrar o valor de referência para as correntes de balanceamento de forma a que: i) as perdas totais sejam minimizadas (nos super-condensadores, nas baterias e no circuito de balanceamento); ii) o balanceamento da temperatura e estado de carga

seja efectuado com sucesso; iii) seja minimizada a potência solicitada às células de baterias nos regimes agressivos de aceleração e travagem regenerativa.

Para atingir estes objetivos foi adotada a estrutura de controlo com dois níveis, apresentada na figura 1.2. A camada *Low-Level* controla as correntes de balanceamento manipulando a modulação dos sinais dos conversores de potência e é também responsável por estimar o valor do SoC. A camada *High-Level* é responsável por gerar referências para as correntes de balanceamento das baterias usando variáveis de controlo partilhadas entre as duas camadas por comunicação UART. Esta comunicação está representada na figura 1.2 pelas duas setas que representam o sentido da transmissão. A camada *High-Level* envia para a *Low-Level* os sinais de controlo ($u*_j$) e, no sentido oposto, são enviados os estados de carga, as temperaturas, as tensões dos elementos de armazenamento e a corrente no circuito de balanceamento. Esta estrutura de controlo, permite que a potência seja alocada eficientemente e o sistema seja balanceado.

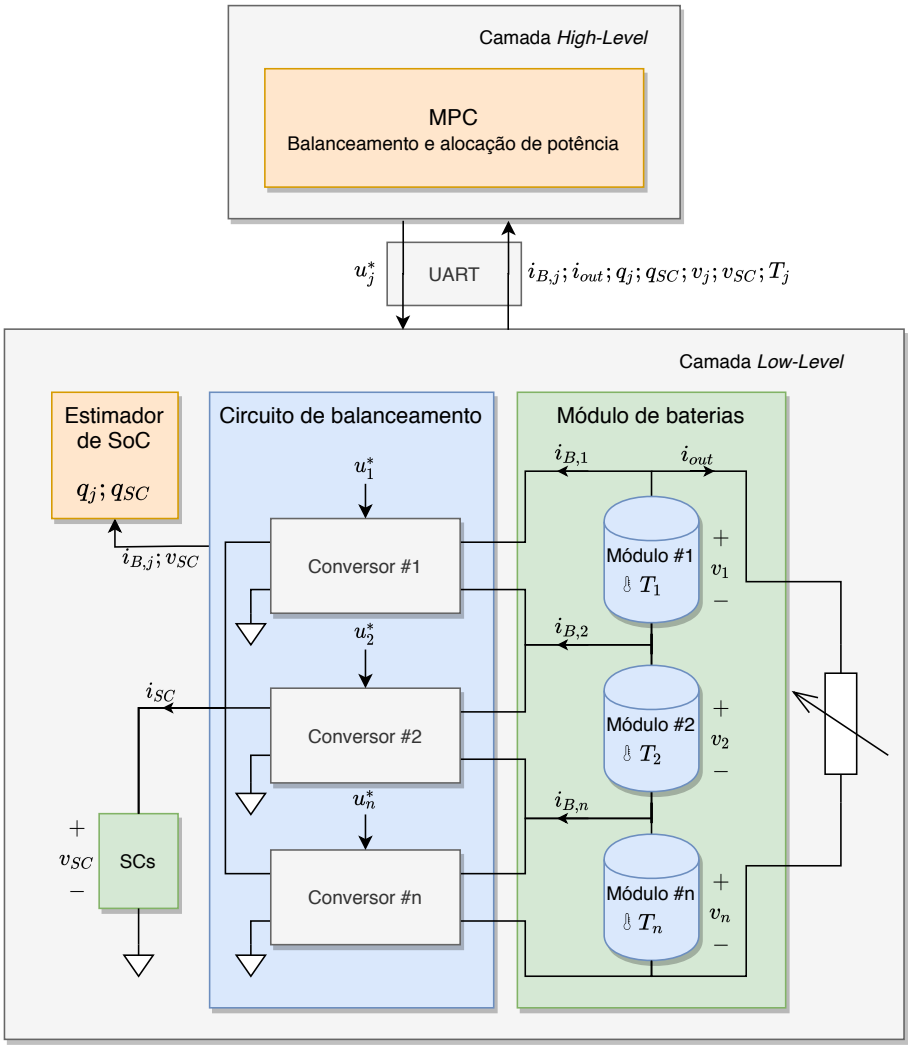


Figura 1.2: Diagrama de blocos do sistema híbrido de armazenamento de energia. Onde $j = 1, ..., n$ e n é o número de módulos no sistema.

Face aos objetivos propostos, seria ambicioso pretender que este trabalho tivesse uma implementação da arquitetura física completa. É então importante clarificar que a camada *Low-Level* da plataforma de testes da figura 1.2 foi desenvolvida por Cláudio Pinto em [11]. A presente dissertação corresponde ao estudo e projeção de um controlo baseado na técnica MPC e no desenvolvimento de um estimador do estado de carga das células.

1.3 Estrutura do Documento

Este documento divide-se essencialmente em seis capítulos. O primeiro, capítulo 1, motiva o estudo e apresenta o objetivo da dissertação. O capítulo 2 consiste numa revisão bibliográfica dos conceitos considerados necessários ao desenvolvimento desta dissertação. Portanto, começa com uma introdução teórica ao conceito de hibridação com supercondensadores e como esta é realizada e às principais topologias de balanceamento. De seguida, são apresentados vários tipos de estimação do SoC que possibilitam o conhecimento preciso do sistema e, para além disso, são estudados vários controladores - desde lineares a controladores ótimos preditivos. No capítulo 3 é realizada a modelação do sistema híbrido de armazenamento de energia de forma a obter um modelo dinâmico do sistema. Com o modelo criado, no capítulo 4 são realizadas várias simulações com o intuito de calibrar e caracterizar o controlador e de clarificar os benefícios do uso de SC no sistema de armazenamento de energia de veículos elétricos. No capítulo 5 apresenta-se os testes realizados na plataforma experimental a que foi submetido o controlador desenvolvido. Assim, para além dos resultados de trabalho experimental realizados, também se inclui neste capítulo os resultados da caracterização experimental das células usadas e o desenvolvimento do algoritmo de estimação do SoC. Por fim, no capítulo 6 é realizada uma análise global do trabalho desenvolvido e são apresentadas sugestões a realizar em continuidade ao trabalho aqui desenvolvido.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será, inicialmente, realizado um levantamento teórico das caraterísticas dos elementos de armazenamento e das principais topologias de hibridação e de balanceamento. Assim, tem como intuito aprofundar o conhecimento e criar as bases necessárias ao desenvolvimento da dissertação. De seguida, são estudados alguns algoritmos de estimação do SoC e de controlo do sistema de armazenamento.

2.1 Sistema de armazenamento de energia híbrido

Embora as baterias e os condensadores sejam ambos dispositivos eletroquímicos, o princípio de operação destes é muito diferente. Na tabela 2.1 é possível verificar que as baterias possuem uma grande densidade de energia, mas uma baixa densidade de potência e um reduzido número de ciclos de vida. Os SC, por sua vez, possuem uma baixa densidade de energia, mas uma elevada densidade de potência e um número muito maior de ciclos de vida. Estas características complementares, se combinadas, permitem obter resultados de desempenho superiores aos sistemas de armazenamento sem hibridação [12]. Devido à maior densidade de potência, eficiência e durabilidade dos SC, estes permitem: diminuir as perdas de energia, absorver a energia da travagem regenerativa e ajudar nos picos de potência permitindo que a bateria carregue ou descarregue menos vezes e com menor intensidade. Por exemplo, no trabalho desenvolvido em [13], como a bateria de Li-ion tem uma densidade de energia muito maior que a do supercondensador, quando possível, a bateria é usada como a fonte primária de energia, enquanto que os SC ajudam com a aceleração e com o aproveitamento da travagem regenerativa. Assim, é tomado partido das características complementares referidas anteriormente.

2.2 Conceitos de Hibridação

A introdução de hibridação possui vários benefícios graças à complementaridade de características entre os SC e as baterias, como referido anteriormente. No entanto, ao adicionar SCs

Elemento de armazenamento	Tensão nominal (V)	Densidade de energia (Wh/kg)	Densidade de potência (kW/kg)	Ciclos de vida
Li-Ion	3.6	80 a 170	0.8 a 2	Até 1200
Li-Polymer	3.7	130 a 200	1 a 2.8	Até 1000
Li-Iron Phosphate	3.2/3.3	80 a 115	1.3 a 3.5	até 2000
SC	2.5/2.7	2 a 10	4 a 10	+1000000

Tabela 2.1: Características típicas de baterias e SC [12].

podem ser introduzidos graus de liberdade que complicam o desenho e gestão do sistema de armazenamento.

Na literatura da especialidade podem encontrar-se diversas configurações passivas e ativas e em [11] é proposta uma classificação em função da topologia de ligação entre as baterias e os SC, onde dependendo da ligação, se podem obter diferentes graus de liberdade. A configuração passiva possui zero graus de liberdade (0D), ou seja, os supercondensadores são ligados em paralelo diretamente às baterias e aos barramentos DC. A segunda divide-se em hibridação com um grau de liberdade (1D) e com dois graus de liberdade (2D). Na configuração com dois graus de liberdade são usados conversores de potência para cada elemento de armazenamento. Assim, é possível dividir a energia pelos SC e baterias como desejado e, também, fornecer uma maior tensão ao inversor, diminuindo perdas no cobre e aumentando a velocidade máxima e tração. No entanto, esta solução é dispendiosa, pelo que a solução com um grau de liberdade (1D) - que embora possua limitações que vão ser discutidas à frente - é a que apresenta a melhor relação custo/desempenho [14].

2.2.1 Zero graus de liberdade

A hibridação com zero graus de liberdade, visível na figura 2.1 a), é a topologia mais simples e com o menor custo. Tem, no entanto, a desvantagem de a energia no SC não ser armazenada eficientemente devido ao facto da tensão na bateria e nos SC ter de ser igual e a divisão de potência ser definida pela impedância interna dos componentes de armazenamento [15].

2.2.2 Um grau de liberdade

Na figura 2.1 b) está representada uma topologia SC/Bateria com 1D. Nesta topologia, um conversor DC/DC é colocado entre a bateria e o SC de modo a que a energia no SC seja completamente controlável. Assim, o alcance da tensão de funcionamento dos SC é muito superior à topologia passiva e, consequentemente, também a energia disponível será superior. Possui, também, o benefício da tensão do barramento DC se manter relativamente constante visto esta ser a tensão aos terminais das baterias de lítio, deixando de ser necessário um conversor extra para alimentar o sistema de tração. No entanto, o conversor introduzido necessita de suportar elevados níveis de potência o que torna esta topologia mais dispendiosa [13].

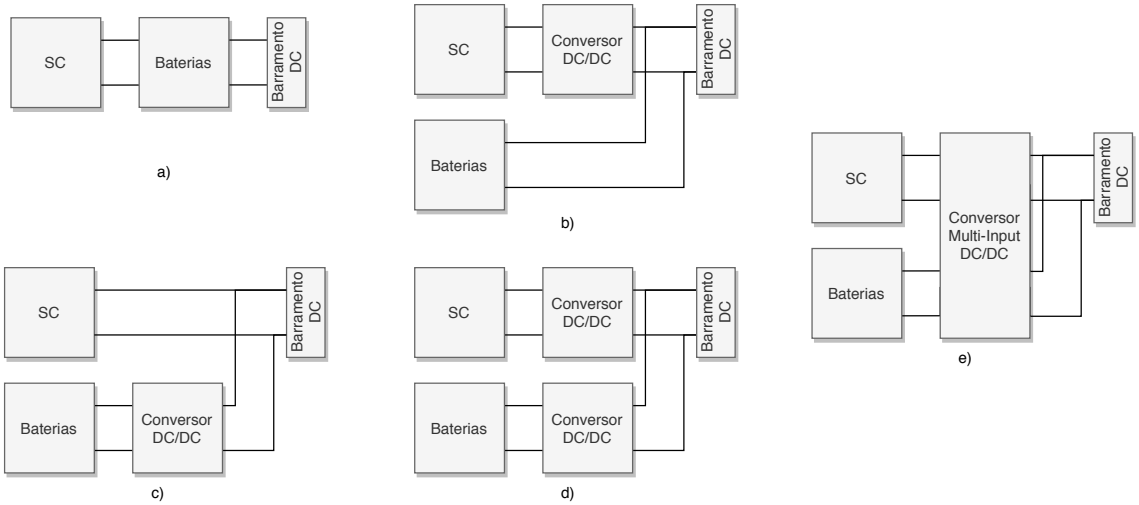


Figura 2.1: Topologias de hibridação. a) Topologia passiva. b) Topologia ativa SC/bateria com 1D. c) Topologia ativa Bateria/SC com 1D. d) Topologia ativa com 2D. e) Topologia ativa com conversor *multi-input* [9].

A topologia Bateria/SC da figura 2.1 c) é semelhante à topologia anterior, mas a posição da bateria e dos SC é trocada. Esta possui o beneficio dos SC atuarem como um filtro passa-baixo que diminui a intensidade das cargas e descargas nas células de lítio [12].

2.2.3 Dois graus de liberdade

Na figura 2.1 d) está representada a topologia completamente ativa. Nesta são usados dois conversores DC/DC bidirecionais que permitem isolar separadamente a bateria e os SC do inversor. A distribuição de energia entre os SC e as baterias pode ser controlada de modo a ser usado o maior alcance de tensão possível dos SC e a tensão do barramento possa ser estabilizada. No entanto, esta topologia é mais complexa que as anteriores, e possui também um maior custo devido ao maior número de conversores [9]. Na figura 2.1 e) está representada a topologia *multi-input* onde é usado um conversor DC/DC de várias entradas que funciona como dois conversores DC/DC. Como a topologia ativa anterior, esta permite distribuir eficazmente a energia pelas baterias e SC, assim como utilizar a energia armazenada nos SC ao máximo. No entanto este conversor é de difícil controlo e possui uma estrutura e custo elevados [12].

2.3 Balanceamento do Sistema de Armazenamento de Energia

Como o sistema de tração de um veículo elétrico necessita de correntes e tensões de alimentação relativamente elevadas, é necessário colocar as baterias em série e em paralelo. Ao colocar as baterias em paralelo é aumentada a capacidade, e em série a tensão. Quando as células são ligadas em paralelo as tensões das baterias são balanceadas naturalmente, no entanto quando são ligadas em série estas sofrem das mesmas correntes de descarregamento/carregamento o que, devido à existência de baterias com menor capacidade, leva ao sobre-carregamento ou

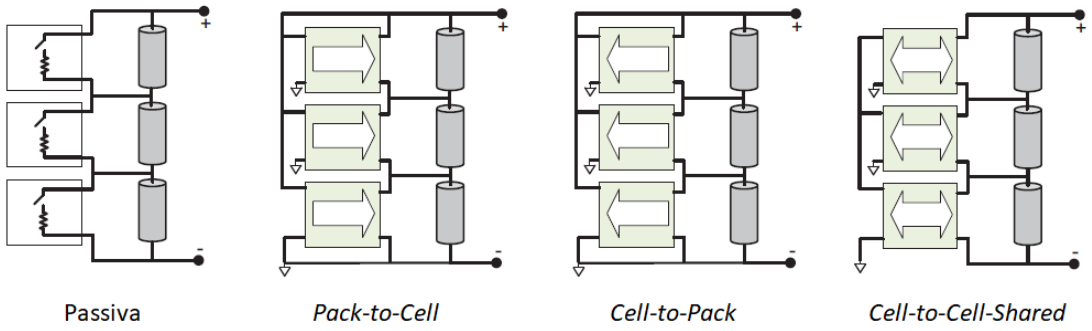


Figura 2.2: Topologias de balanceamento [15].

sobre-descarregamento das baterias com o pior desempenho, provocando a sua degradação precoce. Sendo assim, um problema do desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia é a falta de uniformidade da capacidade, da impedância interna e das características térmicas das células que limitam o desempenho do sistema à da pior célula [16]. Para minimizar a não uniformidade na capacidade existem várias soluções (ativas e passivas) de balanceamento visíveis na figura 2.2 e que vão ser alvo de estudo.

Solução Passiva

A solução passiva consiste em dissipar a energia das células com maior tensão em calor, usando resistências de *shunt*. É a topologia mais simples de implementar e de controlar. Devido à ausência de um conversor é também a mais económica. No entanto esta solução possui elevadas perdas que a tornam uma solução pouco desejada em veículos elétricos onde a eficiência é essencial [11].

Soluções Ativas

A solução ativa, por sua vez, consiste em redistribuir a energia pela bateria evitando perdas. Existem vários tipos de topologias ativas, como por exemplo, *cell-to-cell*, *pack-to-cell* e *cell-to-pack*. Na configuração *cell-to-pack* as células com energia em excesso transferem energia para a bateria e na *pack-to-cell* a bateria carrega as células com menor energia. A topologia *cell-to-cell*, por sua vez, permite a transferência de energia entre células individuais e pode ser dividida em variantes distribuídas ou *shared*. Na variante distribuída a transferência de energia só é permitida entre células vizinhas. Na variante *shared* a energia é primeiro transferida para um acumulador e depois enviada para outra célula [11].

Em [17] com base em *Benchmarks* foi concluído que a topologia *cell-to-cell shared* (CCS) é a mais promissora. Oferecendo eficiência superior e melhor desempenho térmico. Na figura 2.3, está representada uma topologia híbrida de balanceamento usada em [15], que tem por base a topologia *Cell-to-Cell Shared* com um grau de liberdade. Nesta topologia os conversores responsáveis pelo balanceamento permitem também realizar a hibridação do sistema.

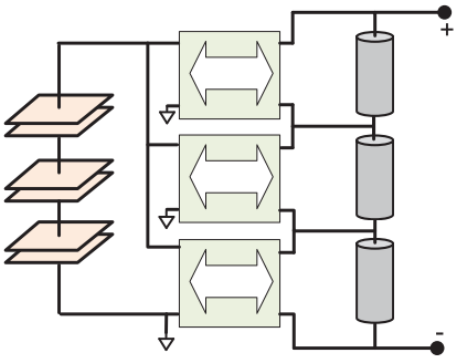


Figura 2.3: Topologia de balanceamento *Cell-To-Cell Shared* com um grau de liberdade [15].

2.4 Controlo do Balanceamento e Gestão de Energia

De seguida são apresentadas várias metodologias de otimização para a gestão de energia e balanceamento das baterias. Os métodos propostos, como representado na figura 2.4, classificam-se em duas categorias principais: baseado em regras e otimização. O controlo ótimo pode ser dividido na forma como é otimizado para um ciclo de condução em não-causais e causais/tempo real. As não-causais dependem de informação do passado e do futuro no processo de otimização e as causais dependem do *feedback* do veiculo elétrico para a definição da função de custo e para a otimização [18].

2.4.1 Controlo baseado em regras

Este método de controlo consiste em vários modos de funcionamento que dependem do SoC dos supercondensadores e das baterias. Estes modos de funcionamento são baseados em intuição humana, no estabelecimento de heurísticas ou modelos matemáticos simplificados e, por isso, não asseguram uma solução óptima e são difíceis de afinar para a melhor solução. Contudo, são flexíveis, de baixa complexidade, baixo esforço computacional e não necessitam de conhecimento matemático aprofundado do sistema. Como o esforço computacional é reduzido, é aplicável em sistemas de tempo real. Divide-se essencialmente em duas áreas principais: baseado em regras determinísticas e controlo Fuzzy [19].

2.4.1.1 Máquina de estados

Máquinas de estado ou diagramas de fluxo lógicos são uma solução computacionalmente pouco exigente e tipicamente usada. Consiste num grupo de estados relacionados entre si usando transições. A cada estado corresponde uma ou várias ações de controlo e uma ou várias transições que disparam dependendo de alterações nas condições de operação [19, 20, 21].

Na figura 2.5 está representado o fluxograma de controlo usado em [22]. Inicialmente, é verificado se a potência é negativa ou positiva - se for negativa há uma transição para um estado

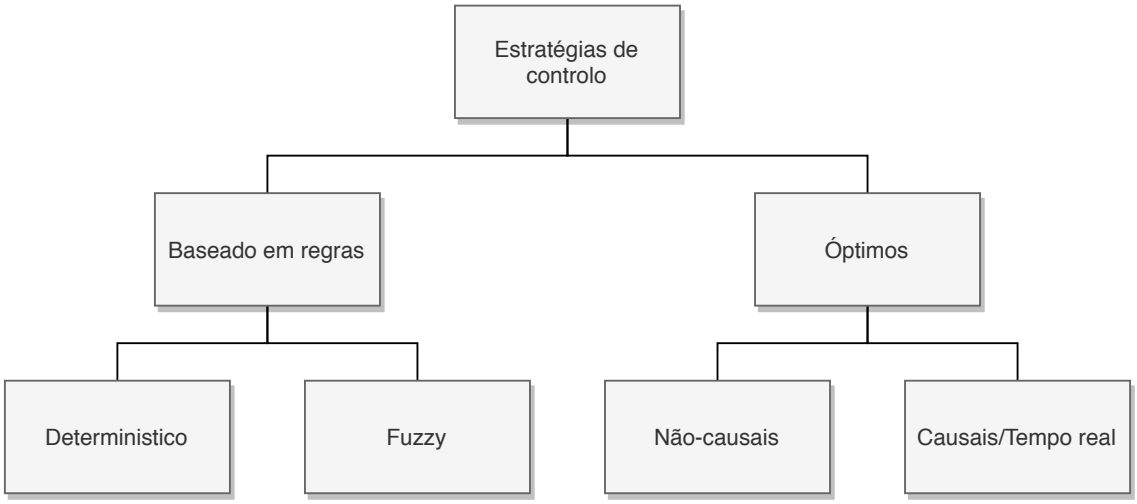


Figura 2.4: Árvore de estratégias de controlo [18]

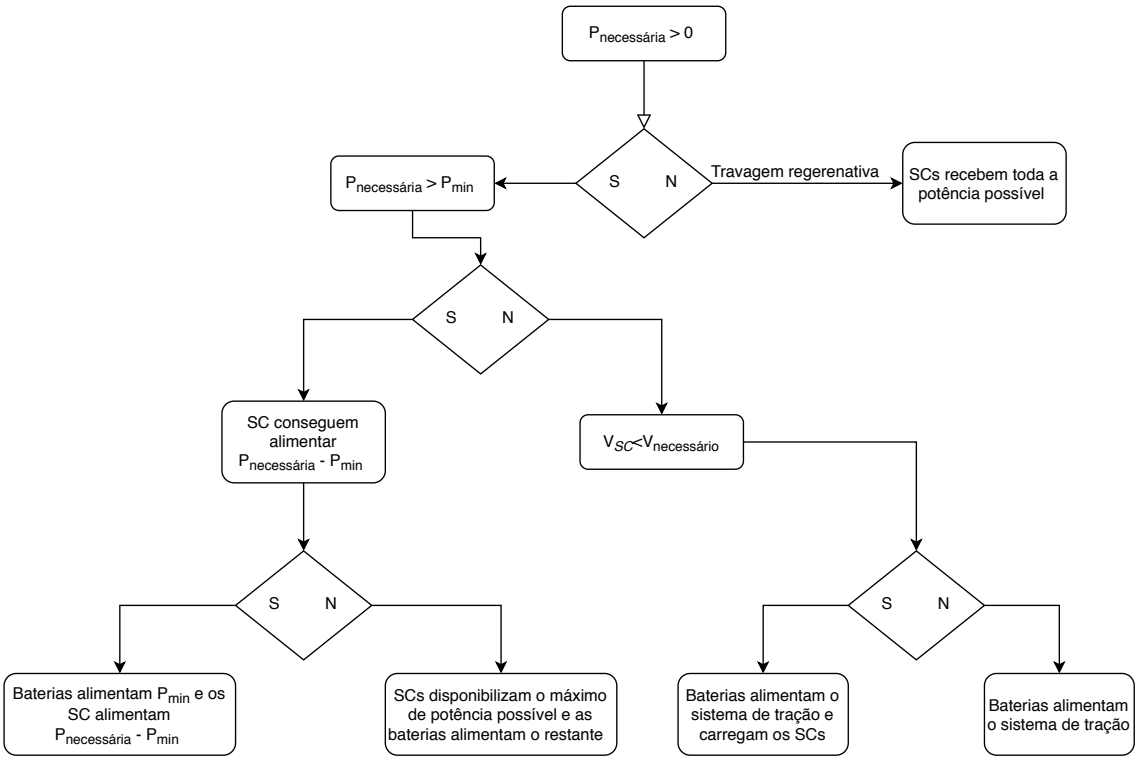


Figura 2.5: Fluxograma lógico de controlo usado em [22].

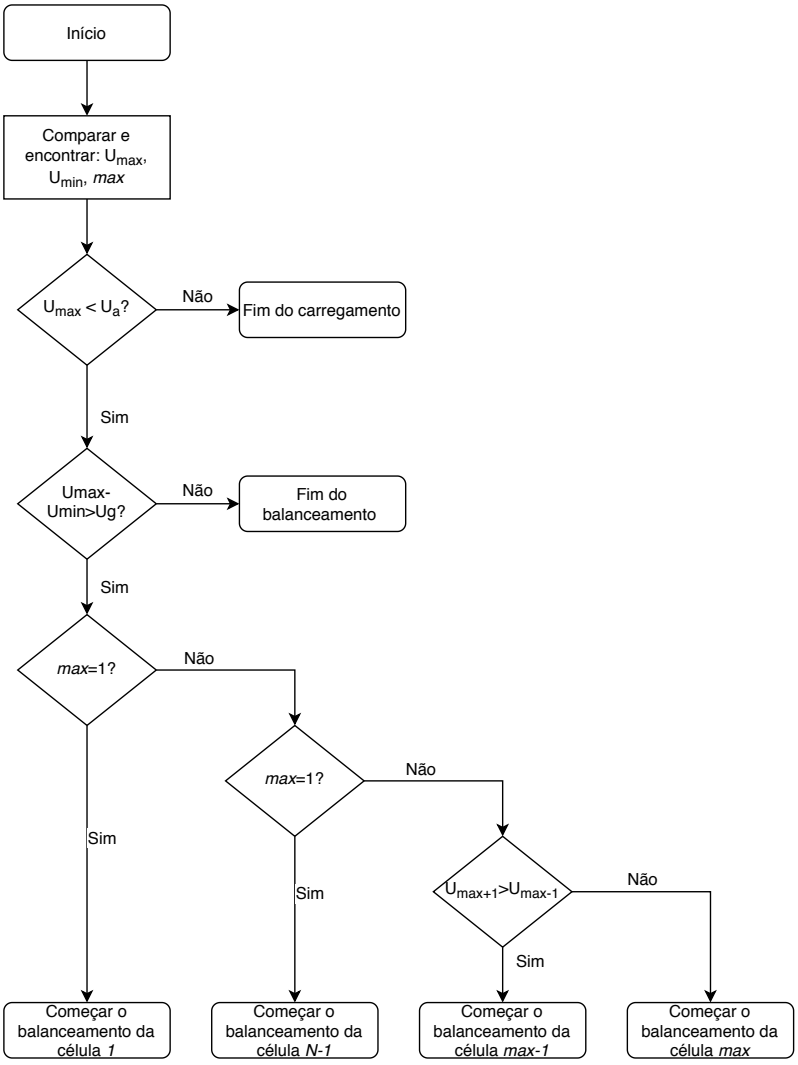


Figura 2.6: Fluxograma do balanceamento da tensão durante o carregamento usado em [21].

onde os SCs recebem o máximo de energia possível; se for positiva e maior que um valor limite mínimo avança para um estado onde é verificado se a tensão nos SCs é suficiente para o pretendido.

No trabalho realizado em [21] o balanceamento do SoC foi conseguido seguindo o fluxograma da figura 2.6. Consiste em medir a tensão de todas as baterias num ciclo e em cada ciclo de medição comparar os valores entre si de forma a saber qual a bateria com o valor mais alto e o mais baixo de tensão. O valor mais alto é depois comparado com o valor limite - se for menor então o processo termina, caso contrário continua. Se a diferença entre o menor valor lido e o maior valor lido for menor que um valor definido previamente então o balanceamento termina, se for superior realiza o balanceamento verificando se a tensão da célula seguinte (N+1) é menor que a da célula anterior (N-1) - em caso afirmativo, carrega a célula *N+1*, caso contrário carrega a célula *N-1*. Este processo é repetido até a equalização ser obtida. O processo anterior, referido para o carregamento, seria semelhante para o descarregamento.

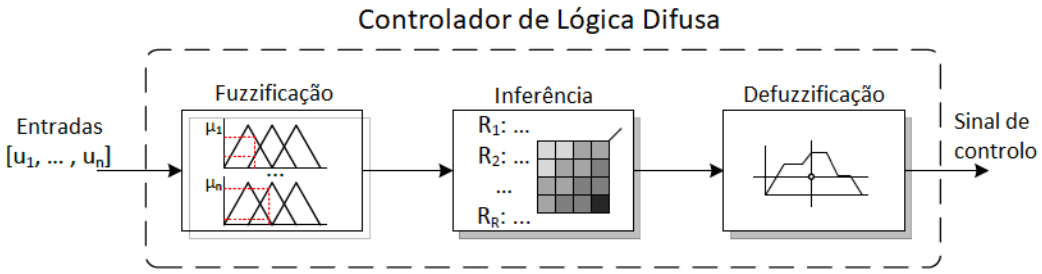


Figura 2.7: Estrutura de um controlador Fuzzy [11].

2.4.1.2 Controlo difuso

Um controlador difuso permite obter conclusões a partir de informações vagas, ambíguas e imprecisas. É, também, capaz de transitar entre modos de operação de uma forma não crespa tornando-o um controlador mais versátil quando comparado com outras estratégias determinísticas. Como é computacionalmente pouco exigente, é possível o seu uso em sistemas de tempo real [19, 23].

O controlo difuso possui três etapas. Na primeira, a fuzzificação, as entradas são convertidas em valores difusos usando funções de pertença para cada entrada. Estas funções de entrada podem ser: triangulares, gaussianas ou trapezóides. Na segunda etapa, a inferência, é determinado o grau de pertença da entrada difusa, tendo em conta as regras definidas anteriormente para cada entrada, e aciona as regras com base neste ponto. As regras acionadas são depois combinadas para formar ações de controlo, a defuzzificação. Nesta última etapa, são combinados os resultados de todas as regras para obter uma conclusão para a entrada [24, 25].

Em [26] os autores aplicaram um controlador difuso num sistema híbrido com supercondensadores e baterias, demonstrando que, embora possua limitações como a dificuldade em otimizar, este é capaz de suportar sistemas complexos.

2.4.2 Controlo ótimo

Um controlo ótimo procura a solução ótima ao problema em questão. Contudo, isto nem sempre é a melhor abordagem devido ao maior peso computacional. Sendo assim, para que esta abordagem seja possível de implementar no sistema é necessário efectuar aproximações e outras alterações que simplifiquem o problema de modelação [19].

2.4.2.1 Controlo de modelo preditivo

O controlo preditivo, conhecido como *Model Predictive Control* (MPC), utiliza o conceito de horizonte de predição para calcular as saídas do controlador. Isto é, o MPC usa um modelo do sistema para prever o seu comportamento ao longo do horizonte de tempo considerado e resolve um algoritmo de otimização de forma a encontrar a solução ótima que permite ao sistema seguir

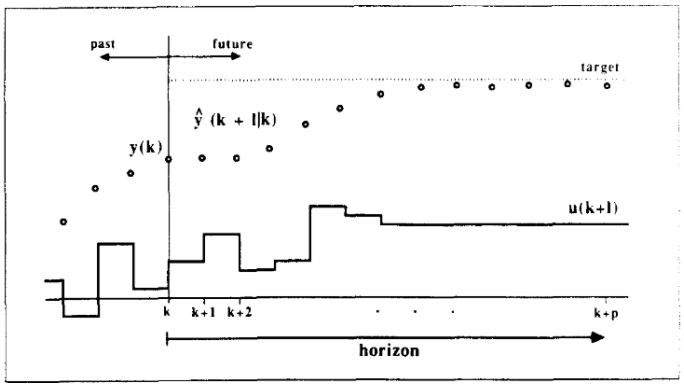


Figura 2.8: Exemplo de um horizonte de predição [28].

uma referência. Na figura 2.8 encontramos um exemplo de comportamento de um MPC para $k \in [k, k+p]$ onde, para cada instante k, recorrendo a um modelo do sistema, são previsto os sinais de controlo futuros de forma a que seja minimizado um determinado critério, tipicamente quadrático, que neste exemplo corresponde a manter a saída do sistema próxima da trajectória de referência [27].

Este modelo do sistema necessita de ser robusto e exato de forma a que a trajetória prevista não possua erros que levem o sistema a sofrer alterações na trajetória prevista. O MPC, além de permitir prever o estado do sistema num horizonte futuro, permite também resolver sistemas com várias entradas e saídas que podem ou não estar ligadas entre si e que podem ou não estar restringidas. O MPC funciona aplicando o primeiro passo da sequência ótima no sistema e no próximo instante de tempo, após receber uma nova medição, o horizonte de tempo avança um instante e o controlador calcula uma nova solução ótima [29]. Um exemplo básico do esquema de controlo está representado na figura 2.9.

Em [31] os autores desenvolveram um modelo não linear de predição de modo a que a função de custo tenha por base o modelo de consumo da bateria. Nesta solução foi também usado um algoritmo de programação linear que permita otimizar a solução no horizonte de predição. Ou

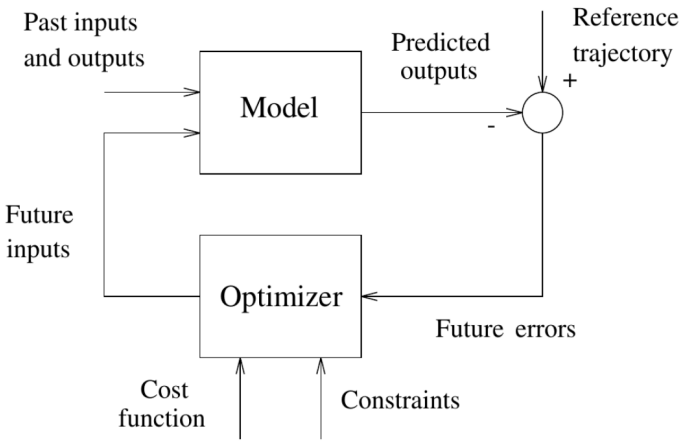


Figura 2.9: Estrutura básica de um MPC [30].

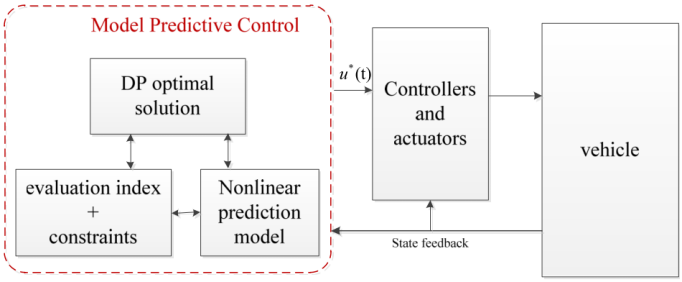


Figura 2.10: Esquema de controlo desenvolvido em [31].

seja, o controlador preditivo é resultado da combinação de uma função de custo com um modelo preditivo e restrições do sistema que são obtidas usando um algoritmo de programação linear. O esquema deste controlador está representado na figura 2.10.

2.5 Estimação do SoC das baterias

O SoC é o rácio entre a energia disponível de uma célula em relação à sua capacidade máxima. É essencial o seu conhecimento visto que ao conhecermos o SoC é possível evitar o sobrecarregamento ou subdescarregamento das baterias. Como referido anteriormente, existem dois tipos principais de balanceamento, ativo e passivo, e ambos necessitam de informação do estado de carga das células para distribuir ou dissipar o excesso de energia. Sendo assim, modelos precisos das baterias asseguram que estas não sofrem de sobrecarregamento, sobredescarregamento e ajudam a quantificar a energia disponível nas baterias [32].

2.5.1 Tensão em Circuito Aberto

A partir de uma bateria em descanso é possível medir a tensão de circuito aberto (OCV) e depois relacionar esta com o SoC usando valores típicos. No entanto, este método implica que a bateria esteja em descanso e em circuito aberto o que nem sempre é possível, visto que, a bateria demora tipicamente várias horas a relaxar. Um outro problema reside no facto de que, mesmo que as baterias sejam fabricadas a partir do mesmo material e com a mesma estrutura o seu comportamento não é exatamente igual entre elas, e então os dados da relação OCV-SOC possuem um erro que poderá ser inaceitável [32, 33]. Na figura 2.11 é possível verificar esta variação entre as várias baterias usadas em [33].

2.5.2 Modelo de Bateria

Tal como no método anterior, é usada a relação OCV-SOC para uma obter uma estimação do estado de carga. No entanto, este método é indireto, no sentido que usa um modelo da bateria para calcular a tensão de circuito aberto (OCV) a partir da tensão aos seus terminais. Na figura 2.12, encontramos um modelo dinâmico da bateria em que a tensão OCV está relacionada com a carga

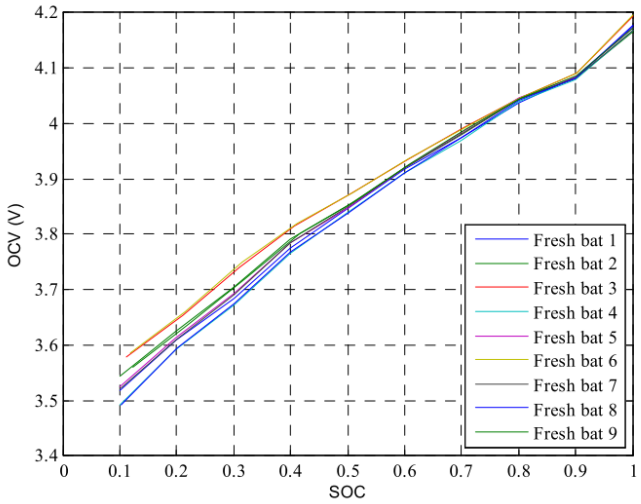


Figura 2.11: Relação entre OCV e SoC de várias baterias idênticas [33].

($V_{OCV} = f(q)$). Em [34] são então usados os valores de impedância interna e o valor da tensão aos terminais da bateria de forma a obter um valor do estado de carga.

Nos trabalho realizados em [32] um processo semelhante foi usado, aqui a impedância interna da bateria é modelada dinamicamente em função do seu SoC e do número de ciclos de carregamento/descarregamento. Com estes valores de impedância, é possível calcular a queda de tensão existente na bateria e obter um valor de OCV corrigido e adaptado à degradação nas baterias.

2.5.3 Contagem de Coulomb

O método Contagem de Coulomb consiste em integrar as correntes de carregamento e descarregamento de forma a calcular a carga consumida/carregada. Pelo que, para este método ter um funcionamento correto é necessário saber o SoC inicial. Após ser conhecido o SoC inicial das baterias é possível aplicar a equação 2.1, onde T_s é o período de aquisição, para obter a estimação pretendida [35].

$$SoC(t+1) = SoC(t) + \frac{I(t)}{Q_{nom}} T_s \tag{2.1}$$

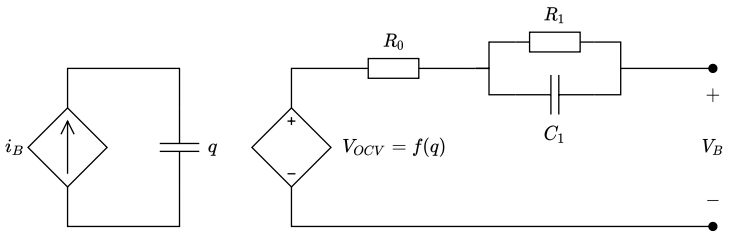


Figura 2.12: Modelo dinâmico de uma bateria [34].

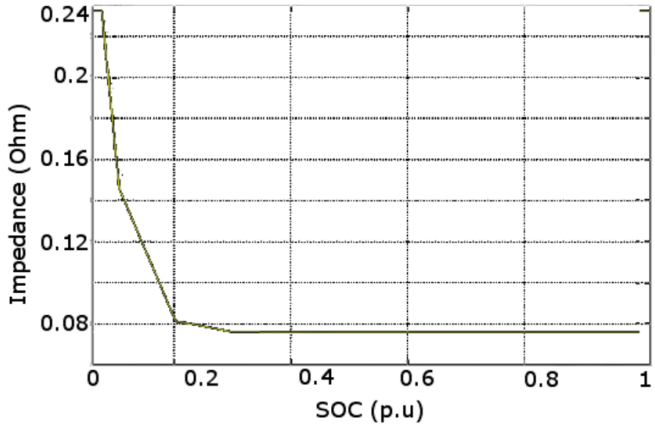


Figura 2.13: Variação da impedância interna de uma bateria em função do SoC [32].

A exatidão deste método depende então da precisão da medição da corrente e da estimação do SoC inicial. No entanto, existem perdas durante o carregamento e descarregamento e também existem correntes de auto-descarga que causam uma acumulação de erros que têm de ser considerados. Estes erros são considerados na equação 2.2 onde η corresponde à eficiência do carregamento e descarregamento e I_{sd} às correntes de auto-descarga [35, 36].

$$SoC(t+1) = SoC(t) - \frac{\eta(I_B(t) - I_{sd}(t))}{Q_{nom}} T_s \tag{2.2}$$

Para obter um algoritmo robusto, em [35] o algoritmo de contagem de Coulomb é combinado com o método baseado no modelo de bateria. O método de contagem de Coulomb é usado para a estimação básica e depois este valor é corrigido por uma malha fechada de estimação.

2.6 Conclusões

Neste capítulo foram discutidos vários métodos de hibridação e balanceamento com o intuito de compreender o seu funcionamento de modo a que o desenvolvimento do controlador possua bases fundamentadas. Concluiu-se que, a introdução de SCs no sistema permite a otimização do armazenamento de energia e que existem várias topologias com benefícios e desvantagens associados a cada uma. Foram também discutidas as várias topologias de balanceamento que possibilitam balancear o estado de carga e a temperatura das células. Existem várias topologias, desde passiva, em que a energia em excesso é dissipada sob a forma de calor, até às várias topologias ativas onde a energia em excesso é distribuída por outras células.

Foram também apresentadas estratégias de controlo baseadas em regras e em controlo ótimo com o intuito de perceber que técnicas existem e quais são as mais indicadas para se realizar um balanceamento eficaz com os recursos disponíveis. Percebemos então que no controlo baseado em regras existem os controladores difusos e os algoritmos determinísticos, em que ambos são flexíveis e permitem trabalhar com problemas complexos e não lineares sem que seja necessário

um conhecimento aprofundado do sistema e sem serem computacionalmente exigentes. Os algoritmos de controlo ótimo, por sua vez, possuem uma função de custo e um conjunto de restrições. A função de custo, normalmente representa um objetivo a ser minimizado ou maximizado, como por exemplo, a diferença de temperatura entre as células de baterias. Estão também associadas a este controlo restrições que podem ser, por exemplo, valores máximos e mínimos de corrente de balanceamento. No entanto, estes algoritmos são tipicamente computacionalmente exigentes e necessitam de simplificações para poderem ser usados em sistemas de tempo-real.

Por fim, foram apresentadas várias técnicas de estimação do estado de carga das baterias. Já que, uma correta estimação é crucial para o balanceamento eficaz das baterias.

Capítulo 3

Modelação do sistema híbrido de armazenamento de energia

Este capítulo é dedicado aos procedimentos executados face ao estabelecimento do modelo completo do sistema a controlar, assim como à definição da função objetivo e da geração da trajetória pretendida para o estado de carga dos elementos de armazenamento e a temperatura dos módulos de baterias.

3.1 Modelo

Nesta secção é formulado o modelo dinâmico do sistema híbrido de armazenamento de energia. Este, sendo o elemento principal de um MPC, é necessário que seja o mais completo e exato possível de forma a captar a dinâmica do processo e assim garantir uma solução o mais próximo possível da solução ótima.

Na figura 3.1 está representado o sistema a modelar. O módulo de baterias é divido em três sub-módulos, aos quais estão associados uma tensão V_j[V] (para $j = 1, ..., n$, onde n representa o número de módulos), uma capacidade q_j[Ah], uma resistência interna R_j - que modela a queda de tensão e perdas ôhmicas - e a tensão OCV da célula - que é representada pela relação OCV-SoC. Na secção 5.2 serão apresentados os ensaios que determinaram a relação entre a tensão de circuito aberto (OCV) e o estado de carga das células. O circuito de balanceamento é constituído por três conversores bidirecionais que controlam a transmissão de potência entre o módulo de baterias e o de SC e aos quais está associado uma resistência R_B que modela as perdas no conversor. O módulo de SC, à semelhança do módulo de baterias, é constituído por uma resistência interna R_{SC} e possui uma tensão OCV que resulta de uma relação linear com o seu estado de carga. Por fim, no sistema está também representada uma carga de saída variável modelada por i_{out}[A].

Na figura 3.2 está representado o modelo térmico simplificado de um módulo de baterias, onde T_j[^{o}C] corresponde à temperatura na superfície das baterias e T_{env} [^{o}C] à temperatura ambiente. A transferência de calor para o ambiente é modulada por $R_{conv,j}$[K/W] e T_{env}[^{o}C], enquanto que o aquecimento da célula durante o seu funcionamento tem por base a potência dissipada nesta

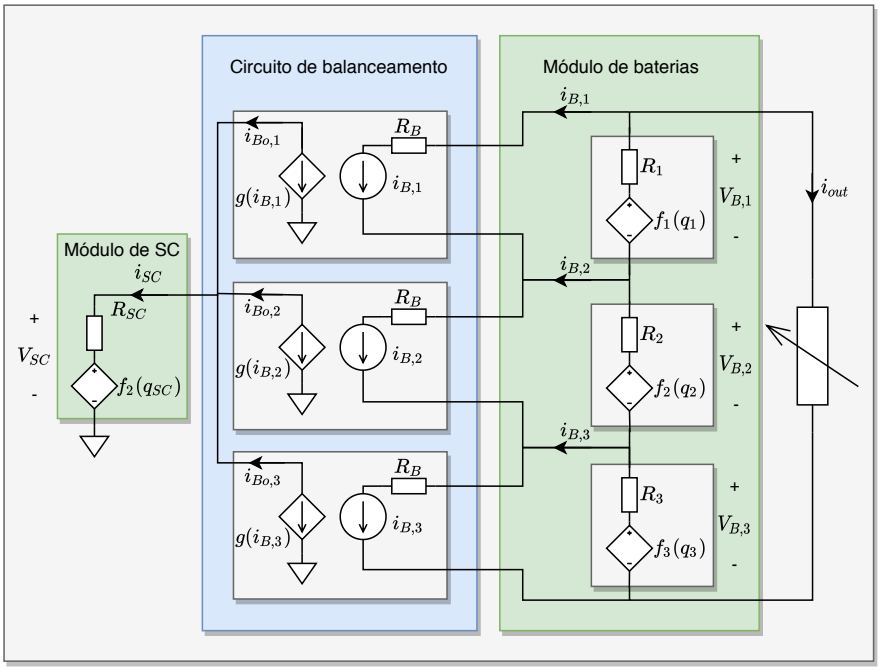


Figura 3.1: Modelo elétrico do sistema para n=3.

($p_{l,j}$[W]). Uma explicação mais detalhada deste modelo térmico é realizada na secção relativa à caraterização das células 5.2.

3.1.1 Modelação

Com o propósito de construir um modelo do sistema, é necessário representar por equações a dinâmica do mesmo. Em virtude da implementação em computador optou-se pela formulação do modelo em tempo discreto, em que T_s é o período de aquisição. Sendo assim, a equação 3.1 representa a dinâmica do estado de carga das baterias, onde $\overline{Q}_j$ é a carga nominal das células e i_j é a corrente que atravessa o módulo. De igual forma, a equação 3.2 representa a dinâmica do estado de carga dos SC. Similarmente, a equação 3.3 modela a dinâmica de temperatura dos módulos e é baseada no modelo térmico da figura 3.2 o qual resulta da formulação desenvolvida na secção 5.2, onde a sua temperatura resulta da relação entre o seu aquecimento causado pelas perdas $p_{l,j}$

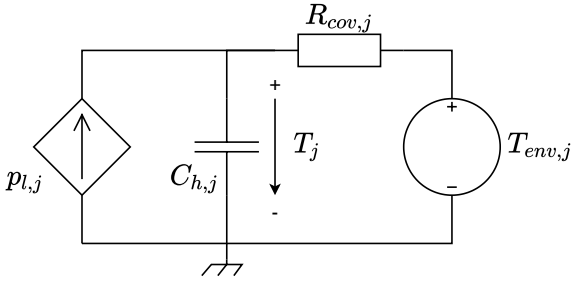


Figura 3.2: Circuito elétrico equivalente da resposta térmica do módulo de baterias [17].

e a condução de energia térmica para o ambiente, consequência da diferença de temperatura das células com a ambiente a dividir pela resistência de convecção ($R_{cov,j}$).

$$\frac{q_j[k+1]-q_j[k]}{T_s} = -100\frac{i_j[k]}{\overline{Q}_j} \tag{3.1}$$

$$\frac{q_{SC}[k+1]-q_{SC}[k]}{T_s} = 100\frac{i_{SC}[k]}{\overline{Q}_{SC}} \tag{3.2}$$

$$\frac{T_j[k+1]-T_j[k]}{T_s}C_{h,j} = p_{l,j}[k] - \frac{T_j[k]-T_{env}}{R_{cov,j}} \tag{3.3}$$

para $j = 1,...,n$ e onde k é o *index* de tempo discreto num horizonte de N instantes.

A fim de modelar a transferência de potência nos conversores formularam-se as equações 3.4, 3.5 e 3.6, onde a potência transmitida aos SC (p_{SC}) é o resultado da potência de balanceamento (p_B) menos as perdas nos conversores (p_{lB}).

$$p_{SC}[k] = p_B[k] - p_{lB}[k] \tag{3.4}$$

$$p_{lB}[k] = \sum_{j=0}^{n} i_{B,j}^2[k]R_B \tag{3.5}$$

$$p_B[k] = \sum_{j=0}^{n} i_{B,j}[k]v_{B,j} \tag{3.6}$$

Se p_{SC} for igual a zero, então toda a energia está a ser transmitida entre os módulos de baterias. Por outro lado, se for diferente de zero significa que os SC estão a ser carregados ou descarregados. A equação 3.7 permite, a partir da potência transmitida aos SC, obter o valor da corrente i_{SC} de modo a ser possível calcular o estado de carga dos SC durante o horizonte de predição.

$$p_{SC}[k] = i_{SC}[k]v_{SC}[k] \tag{3.7}$$

Na equação 3.6 a tensão das baterias é considerada constante durante o horizonte de tempo, dado que, este valor varia muito pouco no tempo considerado devido à grande capacidade das baterias. A tensão v_{SC}, por outro lado, como poderá variar ao longo do horizonte de tempo, é necessário atualizar o seu valor que é proporcional ao estado de carga da mesma. O valor de k_1 corresponde à diferença entre o valor máximo e mínimo de tensão desejada nos SC e k_2 é o valor mínimo de tensão do módulo.

$$v_{SC}[k] = \left(k_1\frac{q_{SC}[k]}{100} + k_2\right) \tag{3.8}$$

As perdas nos conversores de potência são, como já referido, modeladas pela equação em 3.5 e as perdas dissipadas nas baterias e nos SC são modeladas pelas equações 3.9 e 3.10 respetivamente.

$$p_{l,j}[k] = i_j^2[k]R_j \tag{3.9}$$

$$p_{lSC}[k] = i_{SC}^2[k]R_{SC} \tag{3.10}$$

Como representado na figura 3.1, o sistema de armazenamento está conectado em paralelo com o sistema de tração do veículo elétrico. Por sua vez, os módulos estão conectados em série entre si e em paralelo com um conversor bidirecional que controla a corrente $i_{B,j}$. A corrente na bateria resulta na soma da corrente de balanceamento do módulo com a corrente de carga, representado na equação 3.11. Como a corrente de balanceamento está relacionada com a potência dos SC pelas equações 3.4 e 3.6, quando se pretende reduzir o esforço nas células (por exemplo, os níveis elevados de trânsito de potência na aceleração e travagem regenerativa), os SC vão ser usados para minimizar i_j, suportando os picos de corrente da aceleração e da travagem regenerativa.

$$i_j[k] = i_{out}[k] + i_{B,j}[k] \tag{3.11}$$

3.1.2 Função objetivo

Como existem múltiplos objetivos a cumprir, para facilitar a sua compreensão, a função objetivo foi dividida nos seus componentes e foi, posteriormente, normalizada com o propósito de facilitar a compreensão e a calibração. Nas primeiras duas equações é penalizada a divergência entre o valor do estado de carga e de temperatura de cada célula com o valor de referência q_j^* e T_j^*, respetivamente. Em semelhança, na terceira equação pretende-se que o estado de carga dos SC acompanhe a referência q_{SC}^*.

$$J_q[k] = \sum_{j=0}^{n} (q_j[k] - q_j^*[k])^2 \tag{3.12}$$

$$J_T[k] = \sum_{j=0}^{n} (T_j[k] - T_j^*[k])^2 \tag{3.13}$$

$$J_{SC}[k] = (q_{SC}[k] - q_{SC}^*[k])^2 \tag{3.14}$$

O esforço nos módulos representa a amplitude da corrente nos mesmos, e resulta da soma da corrente de carga com a corrente de balanceamento. Então, se a corrente de balanceamento possuir um sinal contrário à de carga, o custo de esforço é minimizado.

$$J_s[k] = \sum_{j=0}^{n} i_j^2[k] \tag{3.15}$$

Na equação seguinte são consideradas todas as perdas do sistema, as quais incluem as perdas nos SC (que devido à natureza destes, vão ser reduzida), as perdas nos conversores (que vão ser definidas pela eficiência destes) e por fim, as perdas nos módulos de baterias.

$$J_l[k] = (p_{lsc}[k] + p_{lB}[k] + \sum_{j=0}^{n} p_{l,j}[k])^2 \tag{3.16}$$

Na função objetivo são, também, penalizadas variações de corrente rápidas com J_u. Este custo será usado nos testes no sistema real como forma de evitar variações bruscas nos sinais de controlo.

$$J_u[k] = (i_{B,j}[k+1] - i_{B,j}[k])^2 \tag{3.17}$$

Sendo que, a função de custo com múltiplos objetivos resulta na equação 3.18, onde $\overline{J_i}$ para $i = q, T, s, l, SC, u$ é um valor obtido posteriormente por forma a normalizar os pesos e obter um equilíbrio entre todos.

$$\text{min. } J_{MPC} = \sum_{k=0}^{N} \alpha_q \frac{J_q[k]}{\overline{J_q}} + \alpha_T \frac{J_T[k]}{\overline{J_T}} + \alpha_s \frac{J_s[k]}{\overline{J_s}} + \alpha_l \frac{J_l[k]}{\overline{J_l}} + \alpha_{SC} \frac{J_{SC}[k]}{\overline{J_{SC}}} + \alpha_u \frac{J_u[k]}{\overline{J_u}} \tag{3.18}$$

Assim, a função objetivo consiste em vários componentes que penalizam individualmente divergências no estado de carga, divergências na temperatura, valores de corrente diferente de zero nos módulos, a energia perdida e variações na corrente de balanceamento. Para cada um destes componentes, existe um peso associado (α_i) que permite definir o rácio de cada parcela em relação às restantes, possibilitando, por exemplo, a enfatização da minimização do esforço e reduzir a minimização da energia perdida de forma a melhorar a métrica i_{RMS}. Resumidamente, é possível definir estes pesos de forma a cumprir as necessidades especificas de cada sistema de armazenamento.

3.1.2.1 Normalização

Para facilitar a interpretação e o uso dos pesos da função objetivo procedeu-se a uma normalização dos custos usando $\overline{J_j}$ de forma a que os custos possuam valores semelhantes entre si. Como o valor do peso pode ser unitário (o comportamento do sistema não é afetado pelo seu valor quando apenas um dos pesos é diferente de zero), realizaram-se cinco simulações com um dos pesos com o valor um e os restantes com valor zero, permitindo a obtenção dos valores máximos de custo durante um ciclo de condução para cada um dos componentes da função objetivo. Para os valores de $\overline{J_u}$ e $\overline{J_{SC}}$ como não podem ser testados individualmente, estes foram obtidos por estimação e teste até se obter um sistema equilibrado. Com os valores adquiridos, obteve-se a tabela 3.1.

3.1.3 Cálculo da trajectória de referência

Uma vez que a função objetivo necessita de um valor de referência para realizar o balanceamento do estado de carga e de temperatura, é necessário calcular uma trajetória para cada instante

Tabela 3.1: Valores de normalização da função de custo.

$\overline{J_q}$	0.01
$\overline{J_T}$	0.0015
$\overline{J_s}$	500
$\overline{J_l}$	100
$\overline{J_{SC}}$	1
$\overline{J_u}$	50

do horizonte de predição. O método de balanceamento escolhido consiste em alterar o estado de carga e a temperatura dos módulos de forma a atingir o valor médio. Então, primeiro é calculado a média do estado de carga e de temperatura prevista para cada instante do horizonte.

$$\langle q \rangle [k] = \frac{\sum_{j=0}^{n} q_j[k]}{n} \tag{3.19}$$

$$\langle T \rangle [k] = \frac{\sum_{j=0}^{n} T_j[k]}{n} \tag{3.20}$$

De seguida, esse valor é usado para calcular a referência para cada instante de tempo. Pretende-se que esta trajetória seja suave e se aproxime com a rapidez correta do valor médio entre os módulos. Isto é ajustado usando a constante τ e permite ao sistema possuir uma trajectória que se ajusta ao comportamento lento da temperatura e estado de carga. O cálculo da trajetória dos SC é semelhante mas o valor objetivo resulta de uma relação linear com o valor médio do estado de carga dos módulos. Na figura 3.3 está representado um exemplo onde o horizonte de predição foi expandido para 22 segundos, onde é possível verificar que a trajetória do estado de carga embora convirja para o objetivo, este processo é lento.

$$\frac{q_j^*[k+1] - q_j^*[k]}{T_s} = \tau \left(\langle q \rangle [k] - q_j^*[k] \right) \tag{3.21}$$

$$\frac{T_j^*[k+1] - T_j^*[k]}{T_s} = \tau \left(\langle T \rangle [k] - T_j^*[k] \right) \tag{3.22}$$

$$\frac{q_{SC}^*[k+1] - q_{SC}^*[k]}{T_s} = \tau \left(k_3 \langle q \rangle [k] + k_4 - q_{SC}^*[k] \right) \tag{3.23}$$

Estas trajetórias não possuem memória dos resultados anteriores e partem do valor atual do estado de carga e de temperatura.

$$q_{SC}^*[0] = q_{SC}[0] \tag{3.24}$$

$$q_j^*[0] = q_j[0] \tag{3.25}$$

$$T_j^*[0] = T_j[0] \tag{3.26}$$

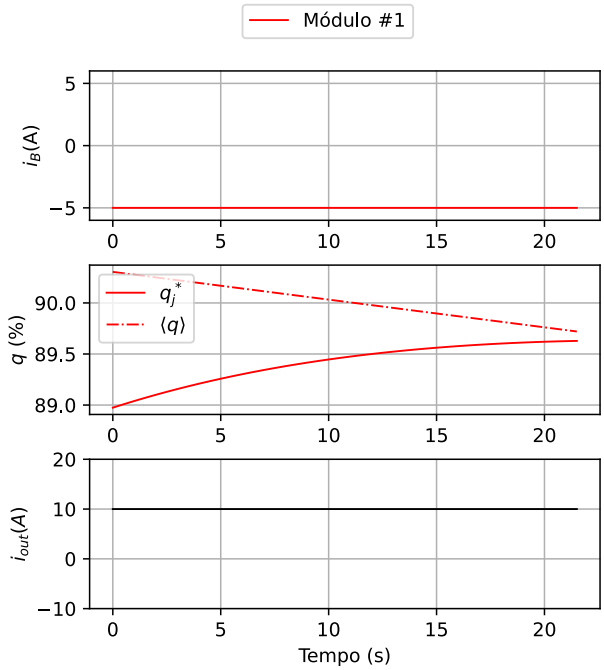


Figura 3.3: Exemplo de geração da trajetória do estado de carga do módulo #1 e a sua corrente de balanceamento prevista. Com N=44 e T_s=0.5.

3.1.3.1 Trajetória dos SC

Em trabalhos anteriores [15], os autores estudaram uma solução baseada em otimização convexa para resolver um problema semelhante. Neste, foi determinado que existe uma relação linear entre a referência do estado de carga dos SC e o valor médio do SoC dos módulos de baterias quando se pretende obter a solução ótima. Essa relação é visível na figura 3.4.

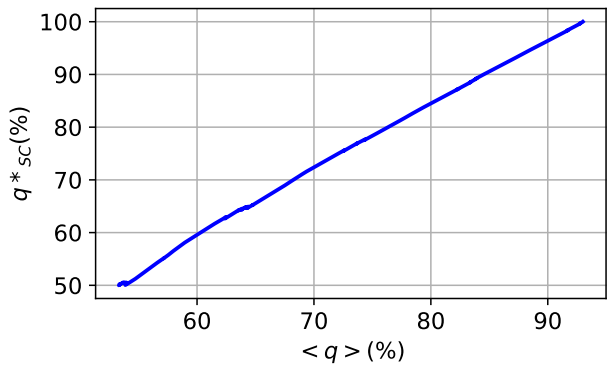


Figura 3.4: *Setpoint* dos supercondensadores em função do valor médio do SoC [15].

3.2 Plataforma computacional *GEKKO*

O *GEKKO* é um pacote de programas de otimização para Python que se especializa em problemas de otimização dinâmicos para equações algébricas não lineares e diferenciais. Este sendo uma biblioteca orientada a objetos permite uma fácil construção do modelo e visualização de resultados de simulação e otimização. Este pacote de programas, permite também o desenvolvimento e utilização de várias ferramentas como otimização em tempo real, estimação com horizonte de predição e controlo preditivo não linear. Esta disponibiliza ao utilizador vários *solvers* numéricos tais como o IPOPT (*interior-point solver*) que é o usado neste trabalho e outros como o BPOPT, MINLP e APOPT [37].

Sendo assim, além de este pacote de programas de otimização ser gratuito para uso académico, possui também um bom suporte com exemplos e explicação de todos os seus componentes, é uma linguagem de modelação algébrica - o que facilita o processo de modelação - e permite o uso de *solvers* numéricos robustos. Tendo sido estes os critérios usados para a sua escolha.

3.2.1 Plataforma

Para facilitar a construção do modelo o pacote de programas de otimização possui oito variáveis diferentes com características únicas. No entanto, neste trabalho foram apenas usados: Constantes, parâmetros, variáveis e variáveis de estado [38].

- **Constantes** são funcionalmente iguais a variáveis Python e são apenas distinguidas para manter consistência. Estas, como o nome indica, mantêm-se constantes durante o horizonte de tempo.

- **Parâmetros** possuem o mesmo comportamento que as constantes, mas são tipicamente vetores com a dimensão do horizonte de predição considerado.

- **Variáveis** são calculadas pelo solver de forma a cumprir as restrições impostas e simultaneamente minimizar o objetivo. São também vetores com a dimensão do horizonte de predição.

- **Variáveis de estado** que são uma variante das variáveis com atributos extra como o '*fstatus*' que permite definir o peso das medições no valor usado, atuando como um filtro.

Com estes tipos de variáveis é possível definir múltiplas equações, as quais no modo dinâmico são discretizadas no horizonte de tempo e são resolvidas implicitamente e simultaneamente pelo otimizador para todos os instantes de tempo com o intuito de minimizar um ou múltiplos objetivos [37].

No anexo D é possível encontrar um excerto do *script* em Python criado. Este *script* pertence a um programa principal, que a cada transmissão recebida do simulador ou da camada *Low-level* da plataforma de testes, corre este *script* numa *thread* em paralelo e quando conclui retorna as referências obtidas.

3.3 Conclusão

De seguida, na tabela 3.2 encontra-se um resumo do problema de otimização do MPC com as restrições ao qual está imposto. Nesta tabela é possível verificar a não-linearidade do problema de otimização que o controlador preditivo terá de resolver. Primeiro, é apresentada a equação reduzida da função objetivo que permite perceber os graus de configurabilidade e calibração que este modelo permite. Sendo possível definir uma importância superior em manter o estado de carga dos módulos próximo entre si em detrimento dos restantes componentes da função objetivo. Na mesma tabela, apresenta-se também o modelo dinâmico do estado de carga e de temperatura dos componentes de armazenamento do sistema, assim como o modelo de trânsito de potências. Por fim, são também introduzidos os limites de segurança, como a corrente máxima de balanceamento, e o estado de carga mínimo e máximo.

Tabela 3.2: Modelação do sistema de armazenamento

Função objetivo:

$$\text{min. } J_{MPC} = \sum_{k=0}^{N} \alpha_q \frac{J_q[k]}{\overline{J_q}} + \alpha_T \frac{J_T[k]}{\overline{J_T}} + \alpha_s \frac{J_s[k]}{\overline{J_s}} + \alpha_l \frac{J_l[k]}{\overline{J_l}} + \alpha_{SC} \frac{J_{SC}[k]}{\overline{J_{SC}}} + \alpha_u \frac{J_u[k]}{\overline{J_u}}$$

Restrições:

Balanceamento

$$\frac{q_j[k+1]-q_j[k]}{T_s} = -100\frac{i_j[k]}{\overline{Q_j}},$$
$$\frac{q_{SC}[k+1]-q_{SC}[k]}{T_s} = 100\frac{i_{SC}[k]}{\overline{Q_{SC}}},$$

Temperatura

$$\frac{T_j[k+1]-T_j[k]}{T_s} C_{h,j} = p_{l,j}[k] - \frac{T_j[k]-T_{env}}{R_{cov,j}},$$

Balanceamento de potência

$$p_{SC}[k] = p_B[k] - p_{lB}[k],$$
$$p_{lB}[k] = \sum_{j=0}^{n} i_{B,j}^2[k] R_B,$$
$$p_B[k] = \sum_{j=0}^{n} i_{B,j}[k] v_{B,j},$$
$$p_{SC}[k] = i_{SC}[k] v_{SC}[k],$$
$$v_{SC}[k] = \left(k_1 \frac{q_{SC}[k]}{100} + k_2\right),$$
$$p_{l,j}[k] = i_j^2[k] R_j,$$
$$p_{lSC}[k] = i_{SC}^2[k] R_{SC},$$
$$i_j[k] = i_{out}[k] + i_{B,j}[k],$$

Limites

$$-5 \leq i_{B,j} \leq 5,$$
$$0 \leq q_j \leq 100,$$
$$0 \leq q_{SC} \leq 100$$

Capítulo 4

Simulação Computacional

Neste capítulo pretende-se inicialmente caracterizar o sistema de controlo e de seguida avaliar o seu desempenho usando um simulador.

4.1 Simulador

Na figura 4.1 está representado o sistema computacional desenvolvido. O MPC é constituído por três componentes: o gerador de referência, o otimizador e o modelo preditivo. O modelo preditivo é um modelo dinâmico do sistema que permite ao controlador calcular a resposta no horizonte de predição do sistema. O gerador de referência calcula a trajetória para o horizonte de predição. E o otimizador é responsável por calcular o valor ótimo das correntes de balanceamento de modo a minimizar a função objetivo e a respeitar as restrições do sistema.

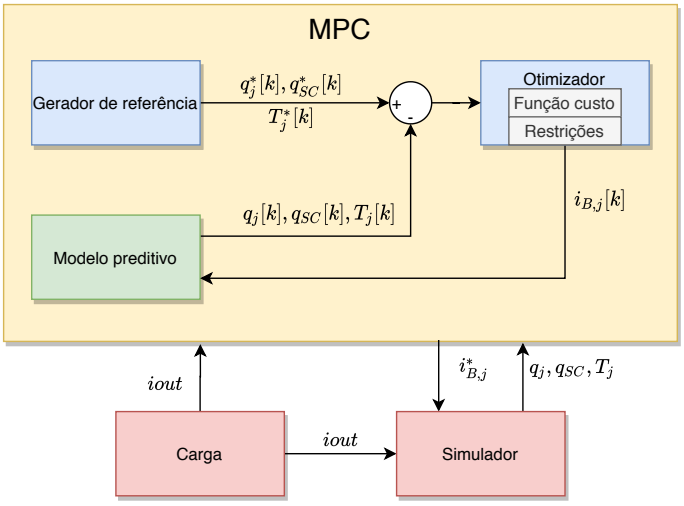


Figura 4.1: Diagrama de blocos do sistema completo a simular, com o controlador MPC, uma carga que emula o sistema de tração do veículo e um simulador do sistema híbrido de armazenamento de energia.

O MPC consiste então num processo de cálculo da trajetória de referência ótima do estado de carga e temperatura dos módulos assim como as correntes de balanceamento para estas trajetórias.

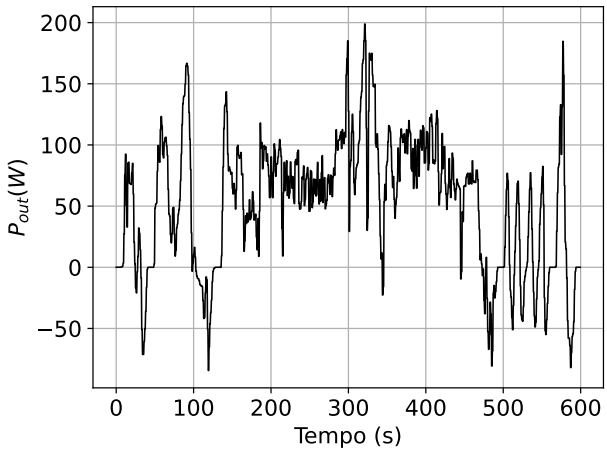


Figura 4.2: *Driving-Cycle* US06 escalado para ser compatível com o plataforma de testes [39].

O MPC apenas comunica ao simulador o primeiro valor obtido no horizonte de predição e o simulador devolve o valor obtido dos estados de carga e temperaturas no instante seguinte usando essa corrente de balanceamento. Esses valores tornam-se o ponto de partida no horizonte de predição e o processo é repetido.

Assim como o modelo preditivo, o simulador corresponde ao sistema representado na figura 3.1, o qual é constituído por três módulos de baterias, um módulo de SC e três conversores bidirecionais. Os módulos #1 e #2 são idênticos mas o módulo #3 possui um melhor desempenho que os dois primeiros (33% mais capacidade e menor impedância interna). Todos os parâmetros podem ser encontrados na tabela 4.1 onde são usados os valores obtidos na secção de caracterização das células deste documento (5.2) e as condições iniciais foram definidas de forma a facilitar a análise do comportamento do sistema. No entanto, ao contrário do modelo preditivo, o simulador apenas calcula o estado de carga e temperatura para as correntes de balanceamento e potência de carga para o instante atual.

A carga consiste no ciclo de condução representado na figura 4.2. Esta comunica ao simulador e MPC o valor de potência necessário no instante atual. Para se poder obter resultados próximos de um ambiente real, foi usado o *Driving Cycle* US06 [39]. Este foi escalado para níveis de potência compatíveis com o sistema de armazenamento a ser usado neste trabalho.

4.1.1 Métricas de desempenho

Para ser possível efectuar a quantificação do desempenho, procedeu-se à definição de seis métricas de desempenho que estão representadas na tabela 4.2 e que serão usadas durante todo o documento. As duas primeiras métricas, permitem, respetivamente caracterizar o desempenho do sistema quanto ao balanceamento do estado de carga e temperatura. O valor de i_{RMS} quantifica o esforço nas células durante o teste e facilita a compreensão da capacidade do controlador em minimizar esta métrica. O valor de L_{totais} representa a energia total perdida no sistema durante a simulação. As métricas T_{max} e q_{min} permitem, respetivamente, perceber quais foram as simulações

Tabela 4.1: Parâmetros do sistema usados na plataforma de simulação e no MPC.

Parâmetros do HBS			
Variáveis	Símbolo	Valor	Unidade
Baterias			
SoC inicial	$q_{0,j}$	[88.0, 92.0, 90.0]	%
Carga Nominal	$\overline{Q}_j$	[8.1, 8.1, 10.3]	Ah
Resistência interna	R_j	[0.017, 0.017, 0.0129]	Ω
Temperatura inicial	$T_{0,j}$	[21.0,22.0,21.5]	°C
Capacidade térmica	$C_{h,j}$	[125, 125, 161]	J/K
Resistência por convecção	$R_{cov,j}$	[13.7,13.7,10.3]	K/W
Temperatura Ambiente	T_{env}	25	°C
Supercondensadores			
SoC inicial	$q_{0,SC}$	90	%
Carga Nominal	$\overline{Q}_{SC}$	0.756	Ah
Resistência interna	R_{SC}	0.0022	Ω
Circuito de balanceamento			
Modelo de perdas	R_B	0.04	Ω
Controlador			
Limites da corrente de bal.	$i_{B,j}$	$-5 \leq i_{B,j} \leq 5$	A
Limites de SoC.	q_j	$0 \leq q_j \leq 100$	%
Limites de SoC dos SC	q_{SC}	$0 \leq q_{SC} \leq 100$	%
Período de aquisição	T_s	0.5	s
Horizonte	N	3	[-]

com o menor aumento de temperatura e qual foi a que possuiu a menor diminuição no estado de carga.

4.1.2 Relação entre as métricas de desempenho

Considerando o grande número de pesos possíveis de calibrar, foram dimensionadas várias simulações que permitam analisar os diferentes comportamentos possíveis de obter com os pesos disponíveis. Estas simulações foram realizadas alterando apenas o valor de um conjunto de pesos (Por exemplo: $\alpha_q = (1 - \alpha_T)$ onde α_T é alterado em incrementos de 0.1 para valores entre zero e um). Exceto, α_{SC} que foi mantido num valor que permita a utilização da hibridação e simultâneamente mantenha o estado de carga dos SC na trajetória, e α_u que foi mantido a zero. Os resultados estão representados nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5 onde, para facilitar a interpretação, foram normalizados usando o método de dimensionamento de recursos representado na equação 4.1. Nesta equação, o valor de x_{max} e x_{min} correspondem, respetivamente, ao pior e ao melhor valor da métrica de desempenho a normalizar entre todas as simulações realizadas. Sendo assim, o melhor desempenho corresponde ao valor 0 e o pior ao valor 1.

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{4.1}$$

Tabela 4.2: Definição das métricas de desempenho.

1: Valor RMS das diferenças no SoC
$\Delta q_{RMS} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \Delta q_{j,RMS}$
2: Valor RMS das diferenças na temperatura
$\Delta T_{RMS} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \Delta T_{j,RMS}$
3: Valor médio RMS da corrente nos módulos
$i_{RMS} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} i_{j,RMS}$
4: Valor da energia dissipada no sistema
$L_{totais} = E_{lSC} + \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} E_{lj} + \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} E_{lBj}$
5: Valor máximo de temperatura durante o teste
$T_{max} = max_{j,k} T_j[k]$
6: Valor mínimo de SoC durante o teste
$q_{min} = min_{j,k} q_j[k]$
Cálculo RMS
$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M} x^2[k]\tau_s}$
M = Duração do ciclo de condução
$k \in M$
τ_s = Período entre aquisições

Em cada gráfico da figura 4.3 está representada a relação entre dois pesos. Estes gráficos permitem realçar que o aumento de um peso possui benefícios para a métrica à qual corresponde mas piora os resultados das restantes, ou seja, existe um compromisso. Por exemplo, na figura 4.3 nos gráficos a) b) e c), está representada a relação entre a métrica do balanceamento de SoC e as restantes métricas e é possível verificar que se pretendermos melhorar Δq_{RMS}, o balanceamento de temperatura e a minimização das perdas e esforço são prejudicadas. Este comportamento repete-se para as restantes métricas.

Em alguns pontos destes gráficos é possível verificar que mesmo sem minimização do esforço, o balanceamento de temperatura e estado de carga permitem reduzir o esforço nas células. O mesmo se verifica no gráfico f), onde a minimização das perdas produz resultados positivos na métrica de esforço. Este comportamento resulta da interligação que existe entre algumas métricas, como por exemplo, quando se pretende balancear a temperatura pode ser benéfico minimizar o aquecimento dos módulos, o que é possível minimizando a corrente nas células.

Os pontos a vermelho dos gráficos da figura 4.3 correspondem ao teste sem balanceamento e sem minimização. É possível verificar que para alguns casos, a métrica L_{totais} é melhor quando não existe controlo, isto porque, quando se pretende realizar o balanceamento ou a minimização do esforço são introduzidas as perdas nos conversores e nos SC.

Foram também realizadas várias simulações onde os pesos α_q, α_T e α_s foram alterados num método semelhante ao explicado anteriormente e com o intuito de obter a relação entre as três métricas de desempenho q_{RMS}, T_{RMS}, i_{RMS} - resultando no gráfico da figura 4.4. Por análise deste gráfico conclui-se que com o aumento do peso α_q a métrica do estado de carga melhora mas o da temperatura e esforço pioram e vice-versa. Com o aumento de α_s o valor de i_{RMS} diminui mas

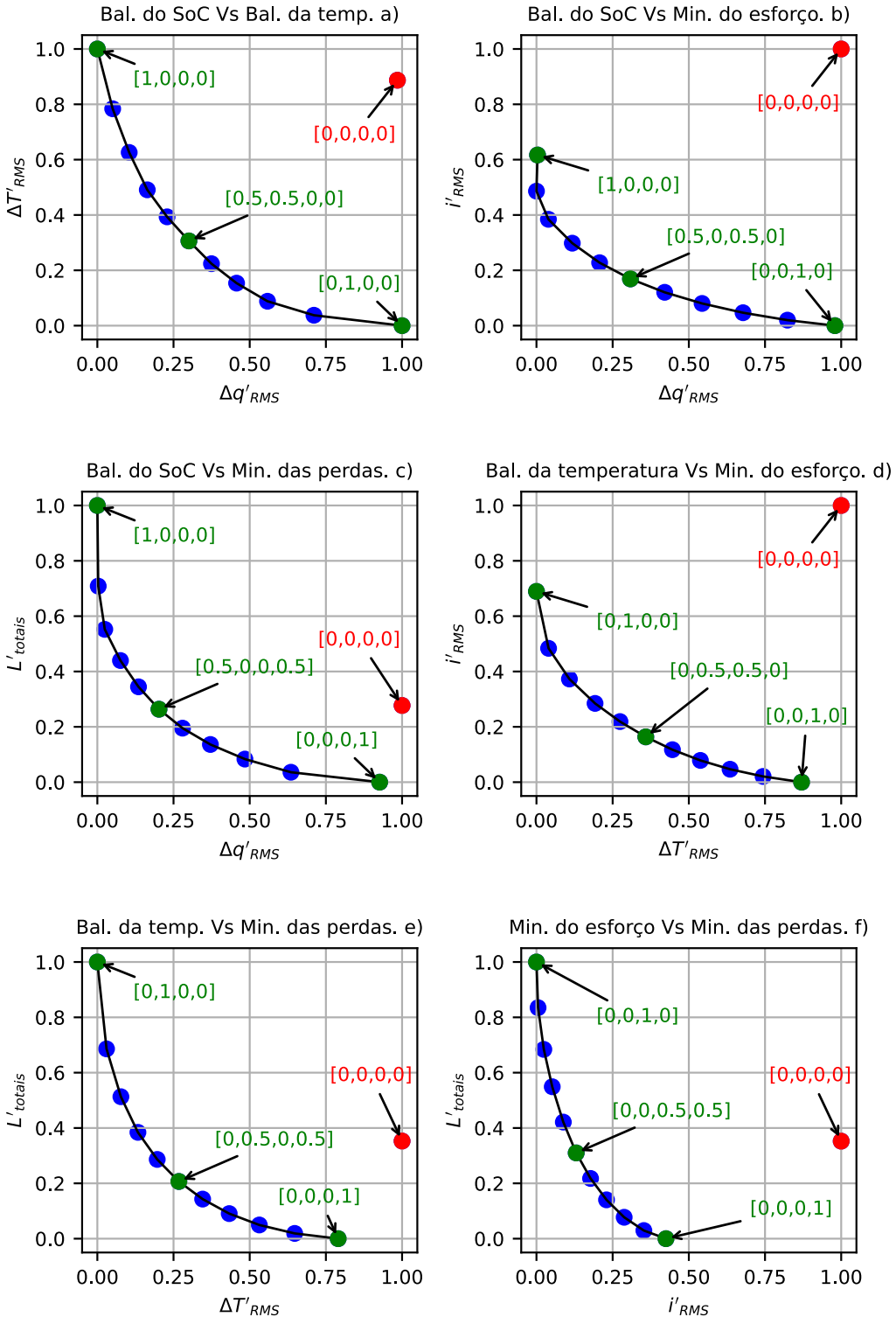


Figura 4.3: Relação entre pesos e os seus resultados normalizados. P=[α_q, α_T, α_s, α_l].

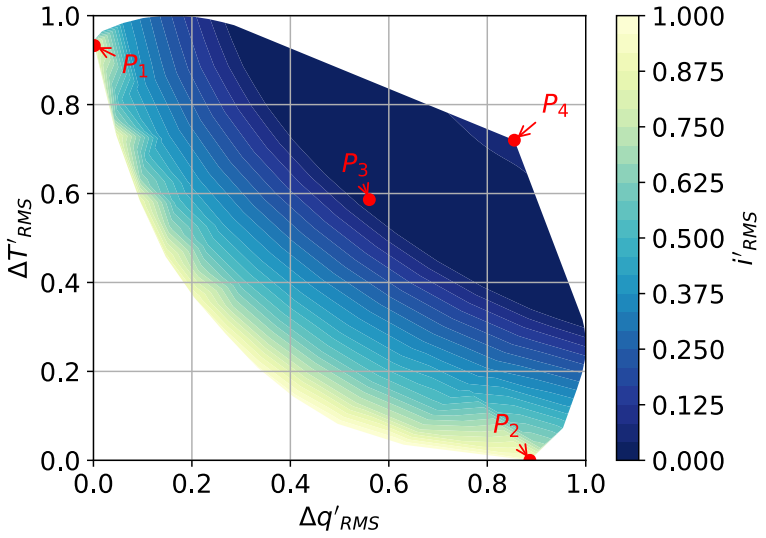


Figura 4.4: Relação entre os pesos α_q, α_T e α_s e os seus resultados normalizados. Para [α_q, α_T, α_s, α_l]: P_1=[1,0,0,0]; P_2=[0,1,0,0];P_3=[0.5,0.5,1,0]; P_4=[0,0,1,0].

o balanceamento da temperatura e do estado de carga pioram. No entanto, quando se pretende apenas minimizar o esforço (P_4), obtêm-se resultados nesta métrica ligeiramente inferiores ao do ponto P_3, onde se introduz à minimização do esforço o balanceamento de estado de carga e temperatura. Este comportamento resulta do balanceamento de temperatura utilizar a corrente na bateria para o cálculo da temperatura, visível nas equações 3.9 e 3.11. Então para balancear a temperatura pode ser necessário minimizar a corrente, como a minimização do esforço neste ponto já é máxima (α_s=1), a introdução do balanceamento da temperatura pode aumentar o custo da corrente nos módulos na função objetivo.

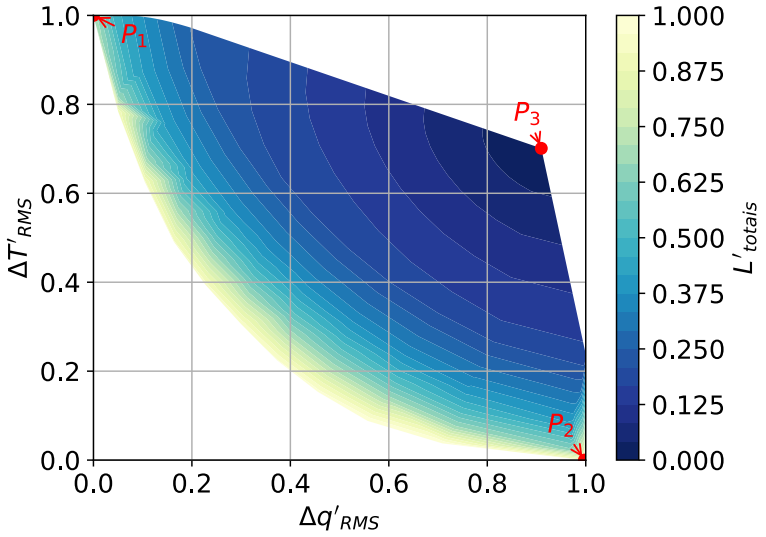


Figura 4.5: Relação entre os pesos α_q, α_T e α_l e os seus resultados normalizados. Para [α_q, α_T, α_s, α_l]: P_1=[1,0,0,0]; P_2=[0,1,0,0];P_3=[0,0,0,1].

Tabela 4.3: Pesos definidos a serem usados nos testes das simulações.

Sem balanceamento
$\alpha_q = 0; \alpha_T = 0; \alpha_s = 0; \alpha_l = 0$
Balanceamento do SoC
$\alpha_q = 1; \alpha_T = 0; \alpha_s = 0; \alpha_l = 0$
Balanceamento da temperatura
$\alpha_q = 0; \alpha_T = 1; \alpha_s = 0; \alpha_l = 0$
Balanceamento do SoC e temperatura
$\alpha_q = 0.5; \alpha_T = 0.5; \alpha_s = 0; \alpha_l = 0$
Minimização do esforço
$\alpha_q = 0; \alpha_T = 0; \alpha_s = 1; \alpha_l = 0$
Minimização das perdas
$\alpha_q = 0; \alpha_T = 0; \alpha_s = 0; \alpha_l = 1$
Balanceamento e minimização
$\alpha_q = 0.5; \alpha_T = 0.5; \alpha_s = 0.5; \alpha_l = 0.5$

Por fim, procedeu-se à simulação para diferentes pesos α_q, α_T e α_l resultando na figura 4.5. Com estas simulações é possível verificar que o aumento de um dos pesos melhora a métrica associada a esse e piora as outras duas. Por exemplo, no ponto de menores perdas o balanceamento de temperatura e estado de carga é reduzido.

4.2 Testes de desempenho

Nesta secção serão realizadas simulações onde o ciclo de condução é repetido seis vezes. Primeiro são realizados os testes da tabela 4.3 para um sistema sem hibridação, isto é, sem serem usados os SC, e de seguida são realizados os mesmos testes num sistema com hibridação. Pretende-se assim, clarificar os benefícios do uso de SC. Os gráficos completos destes testes podem ser encontrados nos anexos A e B.

4.2.1 Resultados sem hibridação

Nesta secção são realizados testes de balanceamento e minimização num sistema de armanzenamento sem hibridação.

4.2.1.1 Balanceamento do estado de carga

Com base nos dados dessa tabela é possível confirmar que o balanceamento do SoC funciona corretamente, tendo obtido um valor reduzido de divergência nos estado de carga dos módulos. No entanto, com o intuito de compreender o comportamento do sistema no balanceamento do estado de carga, o gráfico da figura 4.6 foi produzido. Neste gráfico é visível que o balanceamento do estado de carga é inicialmente realizado transferindo energia do módulo com maior SoC (#2) para o que possui menor SoC (#1), visto que as correntes de balanceamento do módulo #2 são positivas e as do módulo #1 são negativas.

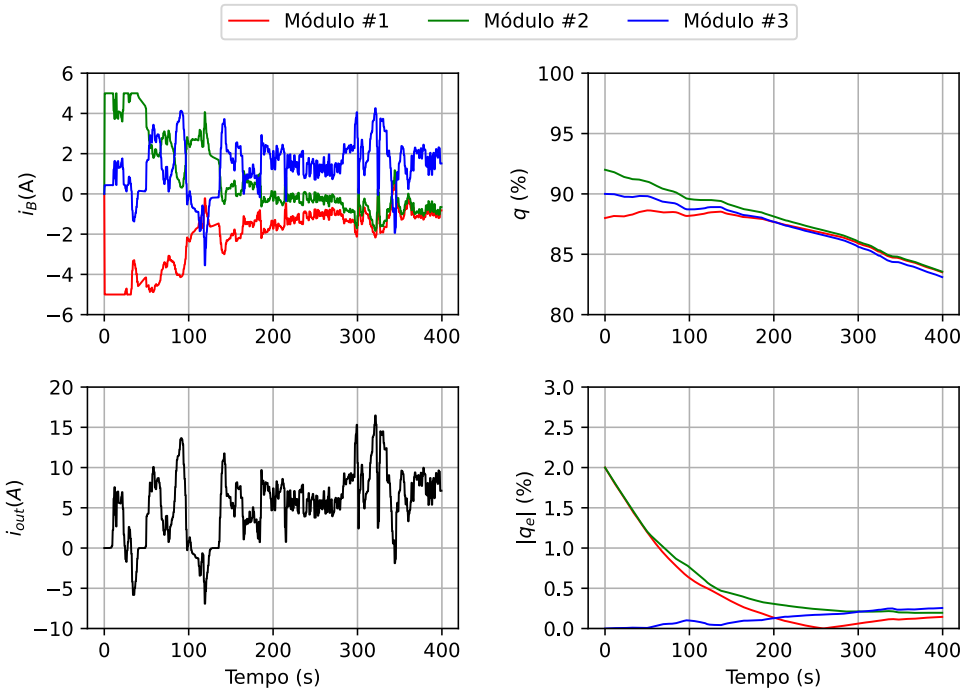


Figura 4.6: Simulação de balanceamento de estado de carga sem hibridação. Ampliado para $t \in [0,400]$. Onde $[\alpha_q, \alpha_T, \alpha_s, \alpha_l]$=[1,0,0,0].

Para $t \in [200,400]$ onde o estado de carga está balanceado, o módulo #3 que possui maior capacidade, tem a sua corrente de balanceamento positiva enquanto que os restantes módulos têm a sua corrente negativa, ou seja, o módulo #3 está a ser descarregado pelas correntes de balanceamento e os módulos #1 e #2 estão a ser carregados. Com este comportamento, $|q_e|$ é mantido, porque desta forma todos os módulos estão a ser descarregados com a mesma intensidade. É, também, possível analisar este comportamento na tabela 4.4, onde o módulo #3 possui um esforço superior aos outros módulos.

Quando o sistema está a ser carregado, $t \in [100,140]$, o módulo #2 como ainda possui maior estado de carga, a energia que deveria de carregar o módulo, é transferida para os restantes. Assim, no gráfico da figura 4.6 é visível que q_2, a verde, se mantém aproximadamente constante, enquanto que os restantes módulos são carregados e os seus SoC se aproximam do SoC do módulo #2.

4.2.1.2 Balanceamento de temperatura

Quanto ao balanceamento da temperatura, é também possível confirmar na tabela 4.4 que foi realizado com sucesso, tendo obtido o melhor valor na métrica ΔT_{RMS}. Na figura 4.7 verificamos um comportamento semelhante ao balanceamento do estado de carga, onde os módulos com menor temperatura são inicialmente esforçados, enquanto que o módulo com maior temperatura aquece com menor intensidade. Comportamento que resulta das correntes de balanceamento diminuírem a intensidade da corrente i_2 que, consequentemente, diminui o aquecimento deste módulo com o compromisso de aumentar o aquecimento nos módulos #1 e #3.

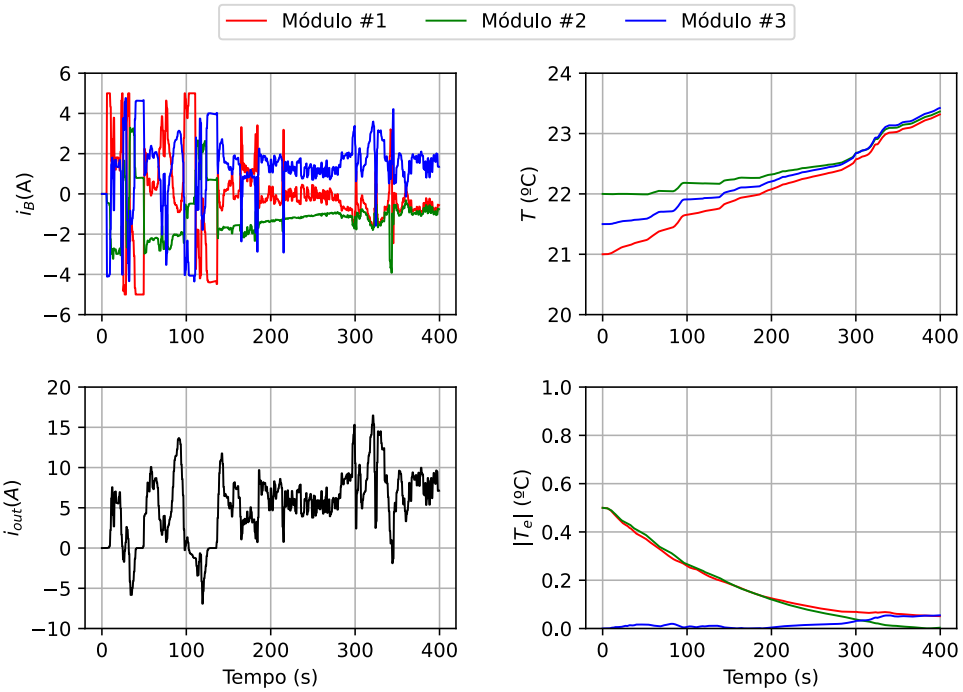


Figura 4.7: Simulação de balanceamento de temperatura ampliado para $t \in [0,400]$ sem hibridação. Onde $[\alpha_q, \alpha_T, \alpha_s, \alpha_l]$=[0,1,0,0].

Com o sistema termicamente balanceado, verifica-se que o módulo com maior capacidade térmica e menor resistência interna possui correntes de balanceamento positivas, enquanto que os restantes possuem correntes de balanceamento negativas. Com este comportamento a corrente nos módulos com menor capacidade térmica é inferior o que, consequentemente, diminui o seu aquecimento. Isto é comprovado na tabela 4.4 onde o módulo #3 possui maiores correntes de esforço.

4.2.1.3 Minimização das perdas

A figura 4.8 corresponde a uma ampliação do teste de minimização das perdas. Neste teste o controlador minimiza as perdas direcionando a corrente para o módulo #3 que possui melhor desempenho que os restantes módulos. No entanto, por análise dos valores na tabela 4.4 torna-se evidente que a minimização das perdas não permite obter resultados muito superiores aos outros testes, visto que os conversores bidirecionais também possuem perdas e embora o módulo #3 apresente melhor desempenho, continua a existir energia perdida neste. Pelo que, a minimização das perdas num sistema sem hibridação apenas funciona se combinado com o balanceamento de temperatura e SoC - prejudicando estas métricas.

4.2.1.4 Balanceamento e minimização

Na figura 4.9 os resultados da 4.4 tabela são normalizados entre si usando o método de dimensionamento de recursos da equação 4.1 o que permite verificar os benefícios e os compromissos

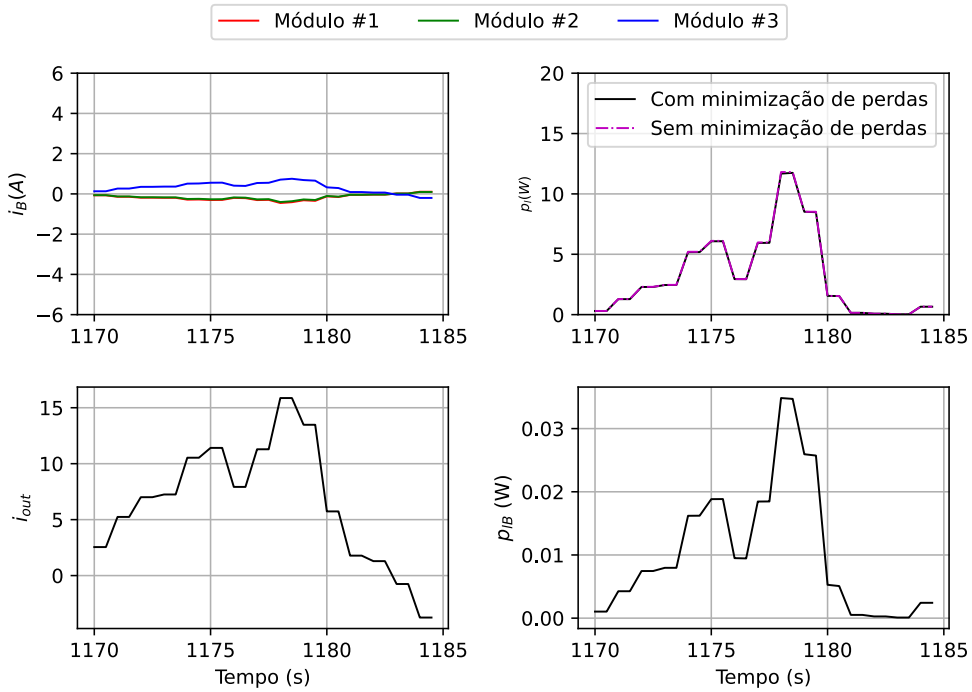


Figura 4.8: Ampliação do teste de minimização das perdas totais no sistema para $t \in [0,400]$ sem hibridação. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,0,1].

de cada conjunto de pesos, sendo que os melhores resultados correspondem ao valor máximo de 1 e os piores ao valor 0. Nesta figura é possível verificar que quando se combinam todos os pesos, a preto, obtém-se um controlador equilibrado com alguns compromissos mas que permite obter bons resultados para todas as métricas.

Na figura 4.9 e na tabela 4.4 é possível deduzir que o balanceamento do estado de carga não só é eficaz a manter o SoC dos módulos balanceados, como também, permite obter um dos valores mais altos de q_{min} no fim da simulação. Pois, quanto menor a divergência, maior vai ser o estado de carga mínimo. Nesta simulação de balanceamento do SoC também se verifica que foi balanceada a temperatura dos módulos. Este comportamento resulta do facto que o módulo com maior capacidade elétrica possui também a maior capacidade térmica, o que resulta em comportamentos semelhantes para o balanceamento das duas métricas. Pelo mesmo motivo, quando o balanceamento do estado de carga é combinado com o balanceamento da temperatura são obtidos resultados de desempenho nestas métricas bastante próximos dos valores individuais. A simulação com o balanceamento e minimização obteve resultados equilibrados, tendo-se realizado o balanceamento da temperatura e do estado de carga e simultaneamente a minimização das perdas com reduzido compromisso. Na tabela 4.4 existe uma coluna para a minimização do esforço nas células, no entanto, como não existe hibridação, não foi possível diminuir o esforço nas células.

Tabela 4.4: Métricas de desempenho para os testes definidos na tabela 4.3 sem hibridação. Os valores a azul correspondem aos melhores valores nessa métrica nesta tabela.

	Métricas de desempenho						
	Sem bal. e min.	Bal. do SoC	Bal. da temperatura	Bal. do SoC e temperatura	Min. do esforço	Min. das perdas	Bal. e minimização
Balanceamento							
Δq_{RMS}	3.98%	0.23%	2.32%	0.30%	3.80%	3.08%	0.64%
ΔT_{RMS}	1.23°C	0.61 °C	0.06°C	0.12°C	1.16°C	0.91°C	0.29°C
Temperatura/SoC							
T_{max}	31.15°C	30.28°C	30.00°C	29.49°C	31.07°C	30.65°C	29.53°C
q_{min}	30.04%	37.84%	35.31%	37.84%	30.69%	31.64%	37.57%
Esforço							
i_{RMS}	6.70A	6.73A	7.02A	6.78A	6.70A	6.70A	6.70A
$i_{1,RMS}$	6.70A	5.77A	6.42A	6.18A	6.62A	6.51A	6.20A
$i_{2,RMS}$	6.70A	5.92A	6.27A	6.05A	6.69A	6.54A	6.15A
$i_{3,RMS}$	6.70A	8.50A	8.36A	8.12A	6.79A	7.04A	7.74A
Perdas							
L_{totais}	7583.16Ws	8443.63Ws	10505.73Ws	8552.22Ws	7564.85Ws	7537.33Ws	7740.30Ws
$L_{B,1}$	0.00Ws	217.84Ws	719.96Ws	310.33Ws	1.00Ws	4.91Ws	63.65Ws
$L_{B,2}$	0.00Ws	179.39Ws	704.81Ws	288.20Ws	0.12Ws	3.83Ws	56.55Ws
$L_{B,3}$	0.00Ws	510.07Ws	905.82Ws	320.25Ws	1.45Ws	16.64Ws	167.79Ws
L_{SC}	0.00Ws	0.06Ws	0.33Ws	0.05Ws	0.00Ws	0.00Ws	0.01Ws

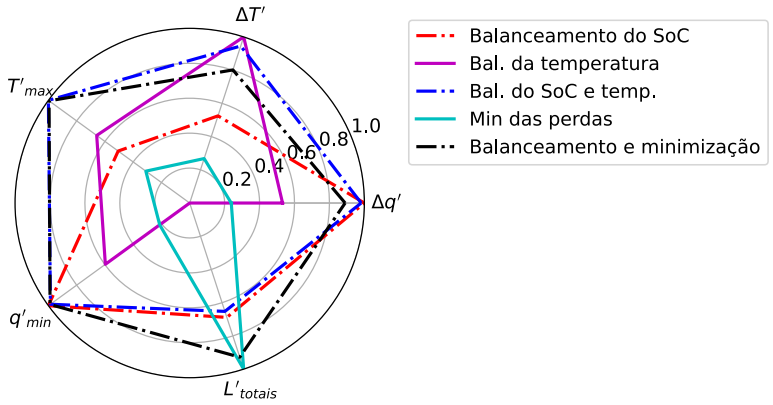


Figura 4.9: Gráficos de radar dos resultados sem hibridação obtidos na tabela 4.4 normalizados entre si. O valor 1 corresponde ao melhor desempenho obtido e o valor 0 ao pior.

4.2.2 Resultados com hibridação

Os testes nesta secção foram realizados com os pesos da tabela 4.3 com $\alpha_{SC} = 0.2$ e $\alpha_u = 0$. O primeiro teste, sem balanceamento, permite obter valores de comparação para os restantes testes. Neste teste embora não exista balanceamento, as correntes $i_{B,j}$ não são nulas pois durante a simulação o estado de carga dos SC segue o valor de referência que vai ser usado nos testes seguintes.

4.2.2.1 Balanceamento do estado de carga

A tabela 4.5 permite verificar que, novamente, o balanceamento individual do SoC funciona corretamente, tendo obtido um valor baixo de divergência. Na figura 4.10 verifica-se um comportamento semelhante ao da figura 4.6 que corresponde ao mesmo teste mas sem hibridação. Inicialmente, os módulos com maior estado de carga carregam os módulos com menor e em regime permanente, o módulo com maior capacidade nominal é descarregado pelas correntes de balanceamento e os restantes são carregados. À semelhança das simulações sem hibridação, o balanceamento do estado de carga permite obter um dos valores mais elevados de estado de carga mínimo e algum balanceamento de temperatura.

No entanto, com hibridação, as correntes de balanceamento aparentam estar mais ruidosas. Esta variação rápida na corrente de balanceamento reflete a variação na corrente de carga a qual é absorvida pelos SC de forma a manter o estado de carga próximo da trajetória calculada.

4.2.2.2 Balanceamento de temperatura

No teste de balanceamento de temperatura da figura 4.11, verifica-se o mesmo comportamento que no mesmo teste sem hibridação. No entanto, com a introdução dos SC, para o mesmo período de tempo o aquecimento dos módulos foi inferior. Mas, na tabela 4.5 constata-se que embora a

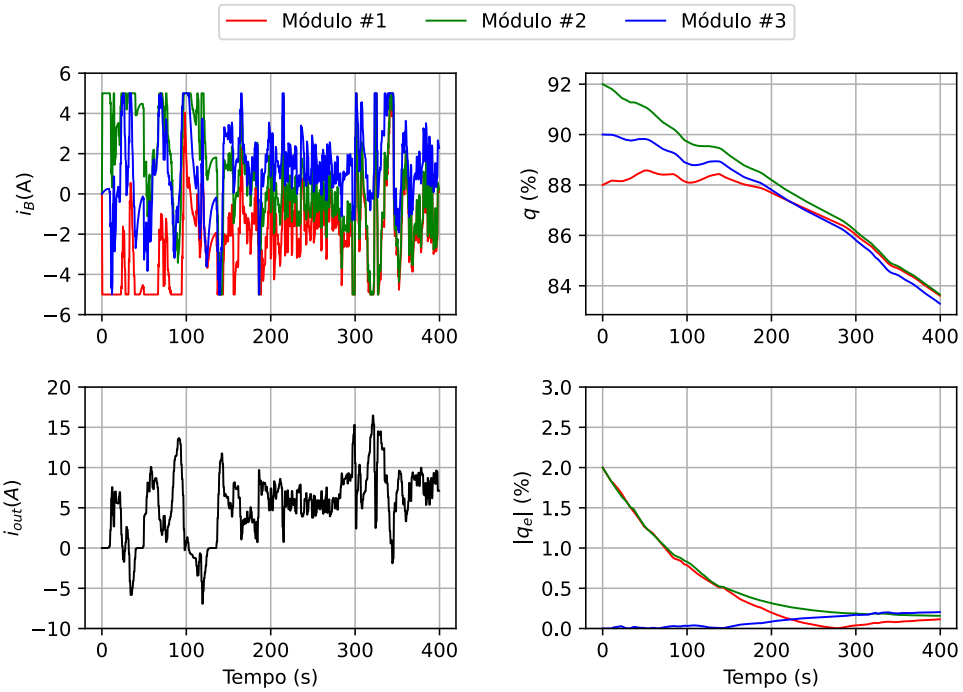


Figura 4.10: Simulação de balanceamento de estado de carga com hibridação ampliado para $t \in [0,400]$. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0].

temperatura máxima tenha sido inferior, como os SC estão a ser usados, a potência perdida nos conversores e nos SC aumenta as perdas totais do sistema.

4.2.2.3 Minimização do esforço

Na figura 4.12 é ampliado o teste de minimização do esforço para que seja possível analisar o seu funcionamento. Neste teste, a corrente nas células ($i_{j,RMS}$) foi minimizada usando os SC como um banco de energia para responder aos transitórios de potência. Comportamento dedutível pela curva p_{SC}, que possui valores espelhados da corrente de saída. Na mesma figura, está também representada a corrente de esforço i_1 comparada com a corrente de carga. A primeira, devido à utilização dos SC, possui uma amplitude muito inferior. Na figura 4.14 verifica-se que a minimização do esforço obteve resultados muito superiores a todas as outras simulações nesta métrica e permitiu obter resultados bons de temperatura máxima mesmo sem balanceamento de temperatura. Por outro lado, as restantes métricas foram prejudicadas.

4.2.2.4 Minimização das perdas

Verifica-se na tabela 4.5 que no teste de minimização das perdas a energia total perdida nesta simulação foi menor que no teste sem balanceamento e minimização, confirmando o seu funcionamento. Como as perdas resultam do quadrado da corrente, existe um crescimento quadrático para estas com o aumento da corrente. Então para as minimizar, o controlador utiliza os SC para diminuir a corrente que atravessa os módulos de baterias usando as correntes de balanceamento.

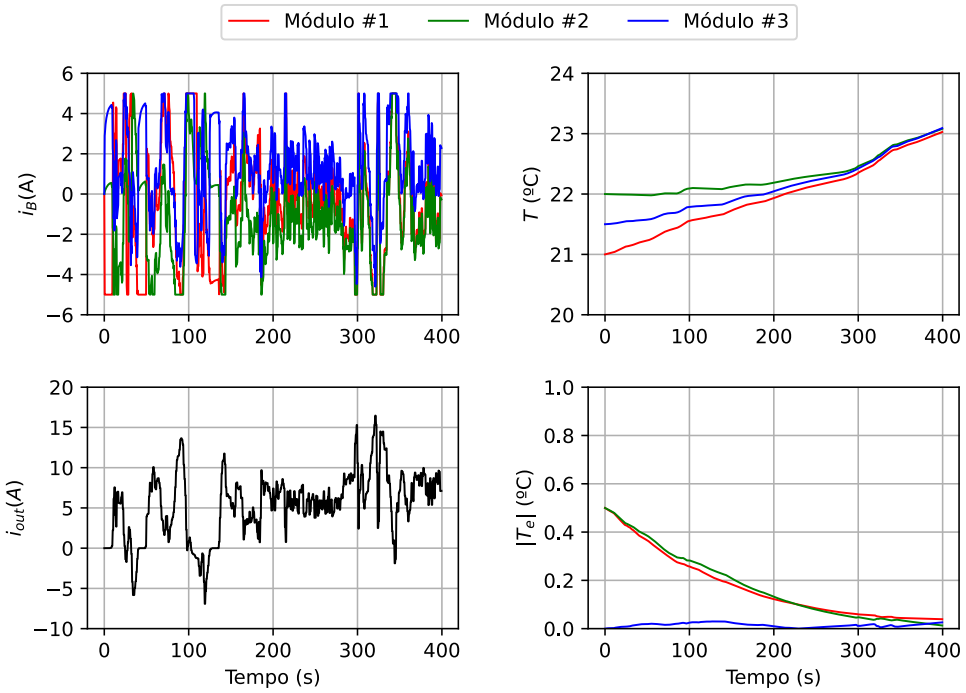


Figura 4.11: Simulação de balanceamento de temperatura ampliado para $t \in [0,400]$ com hibridação. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0].

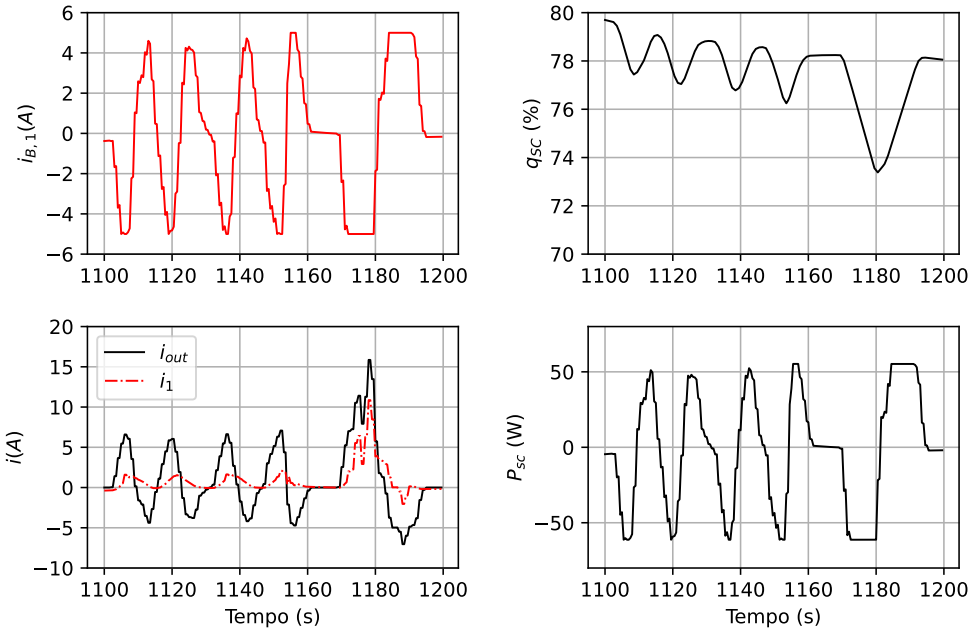


Figura 4.12: Ampliação do teste de minimização do esforço na célula #1 com hibridação. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,1,0].

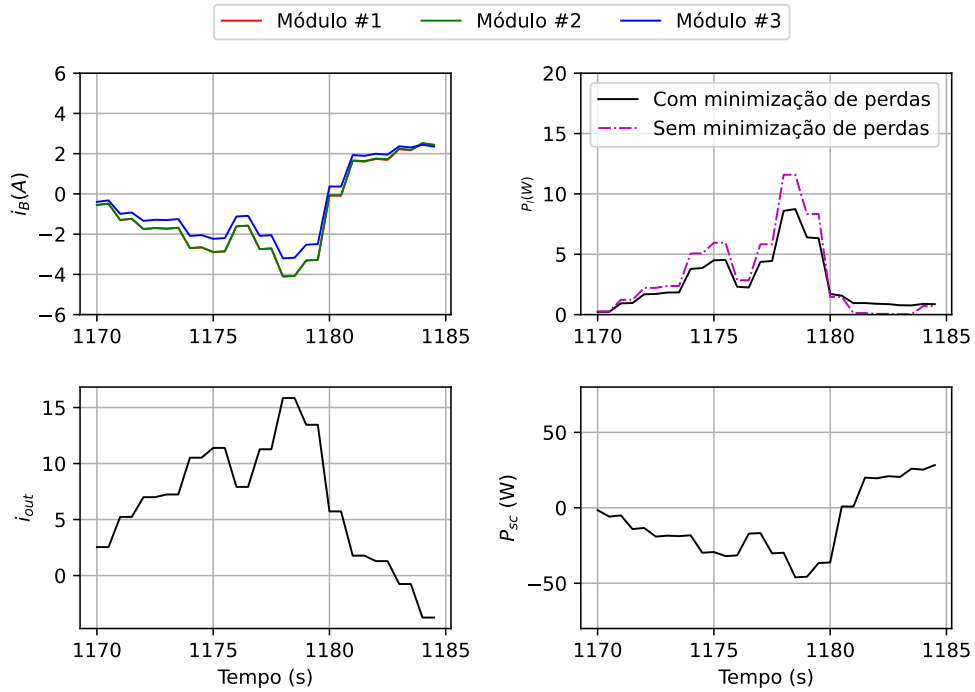


Figura 4.13: Ampliação do teste de minimização das perdas totais no sistema com hibridação para $t \in [1170, 1185]$. Onde $[\alpha_q, \alpha_T, \alpha_s, \alpha_l]$=[0,0,0,1].

Embora assim estejam a ser introduzidas perdas nos conversores e nos SC, como o valor da corrente nestes é bastante inferior, as perdas totais são reduzidas. Este comportamento é visível na figura 4.13 onde, quando a corrente de carga aumenta, as correntes de balanceamento reagem de forma a diminuir i_j e consequentemente as perdas totais.

4.2.2.5 Balanceamento e minimização

Na figura 4.14 confirma-se graficamente que a minimização das perdas obteve os melhores resultados nesta métrica mas tal como na minimização do esforço, a minimização das perdas prejudica as outras métricas.

De notar que, a minimização das perdas consegue diminuir a energia perdida reduzindo a corrente i_j (já que a energia perdida resulta também da equação 3.9). Portanto, quando se pretende minimizar as perdas, é possível diminuir simultaneamente o esforço. O inverso também se aplica, e a minimização do esforço permite diminuir a energia perdida nas células pelos mesmos motivos.

Quando a minimização das perdas e do esforço é combinada com o balanceamento da temperatura e de SoC, é obtido um compromisso entre todas as métricas de desempenho (figura B.3). Nesta simulação, ao serem combinadas todas as características, obteve-se os melhores resultados de q_{min} e T_{max}. Consequência do balanceamento e da minimização do esforço nas células que reduz o seu aquecimento, e da minimização das perdas que diminui a energia perdida no sistema.

Tabela 4.5: Métricas de desempenho para os testes definidos na tabela 4.3. Os valores a azul correspondem aos melhores valores nessa métrica nesta tabela.

	Métricas de desempenho						
	Sem bal. e min.	Bal. do SoC	Bal. da temperatura	Bal. do SoC e temperatura	Min. do esforço	Min. das perdas	Bal. e minimização
Balanceamento							
Δq_{RMS}	3.88%	0.22%	1.47%	0.34%	3.75%	3.01%	0.68%
ΔT_{RMS}	1.19°C	0.45 °C	0.06°C	0.11°C	0.86°C	0.76°C	0.28°C
Temperatura/SoC							
T_{max}	30.78°C	28.57°C	28.77°C	28.25°C	28.58°C	29.05°C	27.50°C
q_{min}	31.80%	38.78%	36.04%	38.79%	31.57%	33.23%	38.56%
Esforço							
i_{RMS}	6.59A	6.15A	6.51A	6.26A	5.71A	6.09A	5.74A
$i_{1,RMS}$	6.59A	5.34A	5.97A	5.72A	5.66A	5.93A	5.31A
$i_{2,RMS}$	6.59A	5.51A	5.82A	5.59A	5.71A	5.94A	5.30A
$i_{3,RMS}$	6.59A	7.60A	7.74A	7.47A	5.78A	6.40A	6.61A
Perdas							
L_{total}	7338.91Ws	9217.71Ws	10565.94Ws	9345.55Ws	9062.83Ws	7006.31Ws	8017.73Ws
$L_{B,1}$	2.71Ws	934.60Ws	1050.78Ws	923.02Ws	1053.73Ws	251.19Ws	756.69Ws
$L_{B,2}$	2.78Ws	902.14Ws	1043.48Ws	908.15Ws	1051.39Ws	251.60Ws	808.09Ws
$L_{B,3}$	2.89Ws	844.22Ws	1233.62Ws	787.94Ws	1049.69Ws	199.45Ws	712.49Ws
L_{SC}	1.04Ws	250.99Ws	203.93Ws	223.30Ws	405.42Ws	86.53Ws	266.05Ws

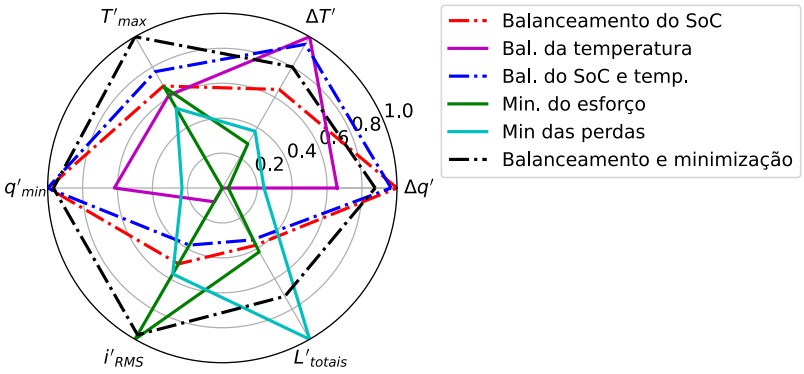


Figura 4.14: Gráfico de radar dos resultados com hibridação da tabela 4.5, normalizados entre si. O valor 1 corresponde ao melhor desempenho obtido e o valor 0 ao pior.

4.2.3 Comparação entre sistema híbrido e não híbrido

Na tabela 4.6 é possível comparar diretamente o mesmo teste de balanceamento e minimização para um sistema sem e com SC. Embora os resultados de balanceamento tenham sido semelhantes obtiveram-se melhores resultados de temperatura máxima e estado de carga mínimo no sistema híbrido, nomeadamente devido à capacidade de minimização de esforço e perdas que os SC introduziram.

Os resultados de esforço com hibridação embora tenham sido superiores, estes introduziram um compromisso nas perdas devido à energia perdida no circuito de balanceamento e nos SC. No entanto, este compromisso pode ser combatido aumentando o custo da minimização das perdas, pois como é visível na tabela 4.5, com hibridação é possível obter valores de perdas totais muito inferiores ao teste sem controlo quando comparado com o sistema sem hibridação.

4.2.4 Grau de hibridação

Pretende-se quantificar os benefícios do tamanho da capacidade nominal dos SC nos resultados de minimização do esforço e das perdas. Para isso, efectuaram-se vários testes onde o rácio γ é progressivamente aumentado mantendo a capacidade das baterias constante. Tendo resultado no gráfico da figura 4.15, onde é possível verificar que quanto maior for o módulo de SC, melhor é o desempenho do sistema. No entanto, devido ao custo acrescido, à dimensão superior, e à menor capacidade dos SC torna-se inviável o seu aumento.

$$\gamma = \frac{q_{SC}}{\sum_{j=1}^{n} q_j} \tag{4.2}$$

Tabela 4.6: Métricas de desempenho para o sistema sem hibridação e com hibridação. Os valores a azul correspondem aos melhores valores nessa métrica nesta tabela.

Métricas de Performance			
	Sem bal. e min.	Sem hibridação	Com hibridação
Balanceamento			
Δq_{RMS}	3.98%	0.64%	0.68%
ΔT_{RMS}	1.23ºC	0.29ºC	0.28 ºC
Temperatura/SoC			
T_{max}	31.15ºC	29.53ºC	27.50ºC
q_{min}	30.04%	37.57%	38.56%
Esforço			
i_{RMS}	6.70A	6.70A	5.74A
$i_{1,RMS}$	6.70A	6.20A	5.31A
$i_{2,RMS}$	6.70A	6.15A	5.30A
$i_{3,RMS}$	6.70A	7.74A	6.61A
Perdas			
L_{totais}	7583.16Ws	7740.30Ws	8017.73Ws
$L_{B,1}$	0.00Ws	63.65Ws	756.69Ws
$L_{B,2}$	0.00Ws	56.55Ws	808.09Ws
$L_{B,3}$	0.00Ws	167.79Ws	712.49Ws
L_{SC}	0.00Ws	0.0Ws	266.05Ws

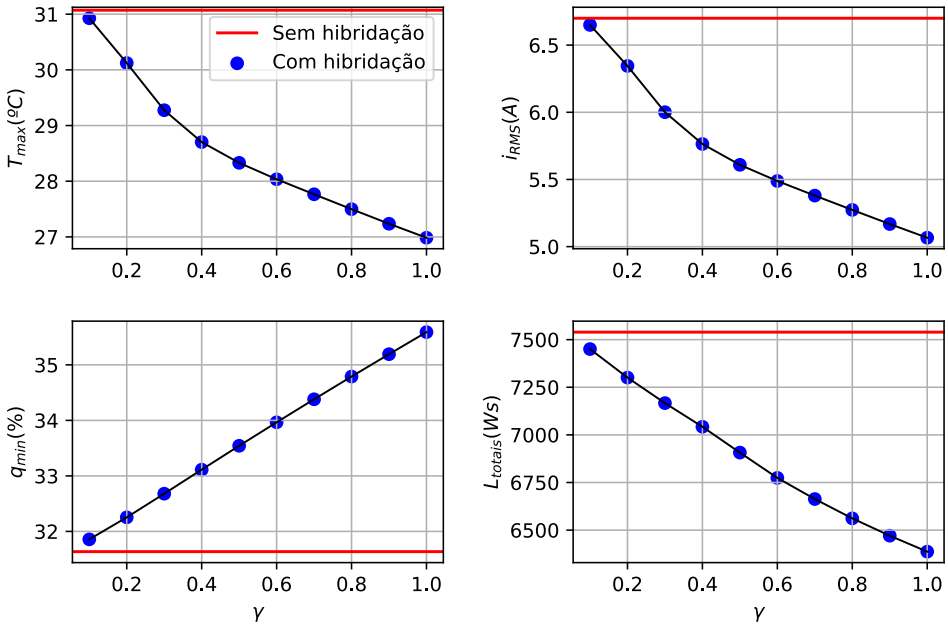


Figura 4.15: Consequência do rácio de hibridação (γ) na temperatura máxima, no estado de carga mínimo, no esforço nas células e nas perdas totais do sistema em cada para seis ciclos de condução. Com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1.0,0.0,0.0,0.0] nos dois gráficos do topo e [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.0,0.0,0.0,1.0] nos gráficos inferiores.

4.2.5 Eficiência dos conversores

Pretende-se quantificar a consequência da eficiência dos conversores na minimização do esforço e das perdas, para isso, realizaram-se várias simulações para diferentes níveis de eficiência alterando o valor do modelo de perdas R_B.

No gráfico da figura 4.16 estão representados os resultados desde um conversor ideal sem perdas até um valor máximo de R_B = 0.5Ω e os traçados a verde e vermelho correspondem a testes com $R_B = 0.04$. Nestes gráficos é então possível verificar que todas as métricas pioram, aproximando-se dos valores obtidos num sistema sem balanceamento e minimização. No caso da minimização das perdas, como está a ser realizado balanceamento do estado de carga e da temperatura, o valor de L_{totais} vai ser superior aos obtidos sem controlo mesmo para valores pequenos de R_B. No entanto, esta métrica para valores altos de R_B fica pior do que em testes de balanceamento sem minimização de perdas. O que permite concluir que para valores de R_B maiores que 0.1Ω a capacidade de minimização de perdas fica comprometida.

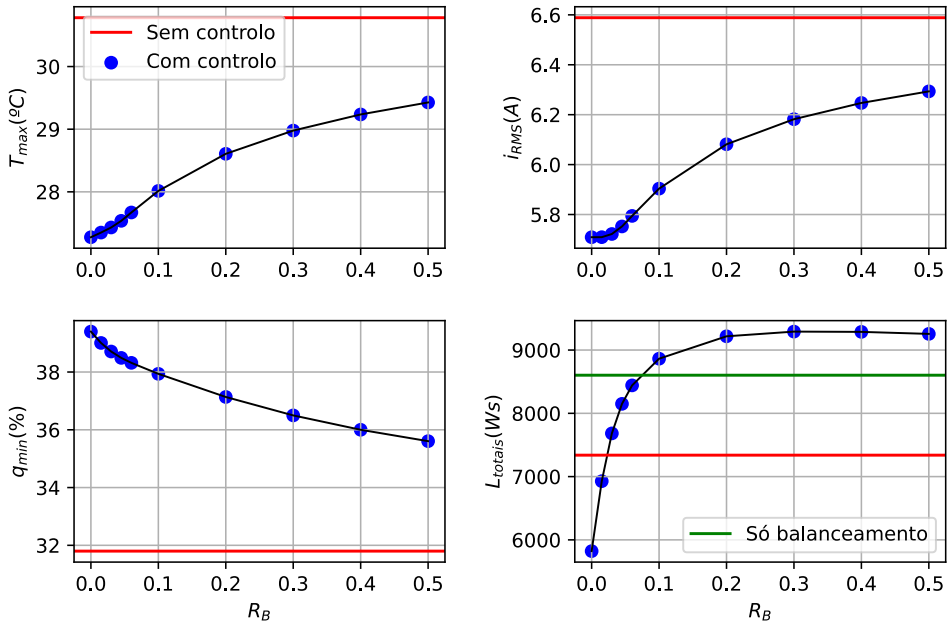


Figura 4.16: Consequência do valor do modelo de perdas R_B dos conversores na temperatura máxima obtida em cada simulação, no estado de carga mínimo obtido, no esforço nas células e nas perdas totais do sistema. Com controlo: [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0.5,0.5]. Só balanceamento: [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.0,0.5,0.5,0.0].

No gráfico da figura 4.17 estão representados os resultados para as mesmas condições do gráfico da figura 4.16, mas para as métricas de balanceamento. Como se pode observar, as métricas de balanceamento de SoC e temperatura são prejudicadas pelo aumento de R_B. Com o aumento de R_B, como está a ser realizada a minimização das perdas, aumenta também J_l e como os pesos

Tabela 4.7: Desempenho do controlador em função da dimensão do horizonte de tempo no Raspberry Pi 4 B para um ciclo de condução.

	Tempo (s)				Desempenho			
N	Médio	Desvio padrão	Máx	Min	Δq_{RMS}	ΔT_{RMS}	i_{RMS}	L_{totais}
2	0.10	0.01	0.19	0.09	0.46%	0.13ºC	5.19A	1006.57Ws
3	0.11	0.01	0.23	0.09	0.45%	0.13ºC	5.34A	1024.70Ws
4	0.13	0.02	0.36	0.09	0.45%	0.13ºC	5.46A	1029.26Ws
5	0.15	0.02	0.37	0.09	0.45%	0.13ºC	5.55A	1030.95Ws
6	0.18	0.04	0.39	0.09	0.45%	0.13ºC	5.62A	1031.69Ws
7	0.22	0.07	0.39	0.10	0.45%	0.13ºC	5.68A	1031.96Ws
8	0.26	0.11	0.40	0.10	0.45%	0.13ºC	5.73A	1032.31Ws

permanecem inalterados, o valor de J_l torna-se muito superior aos restantes custos e consequentemente torna-se a principal parcela da função objetivo a minimizar, prejudicando os restantes.

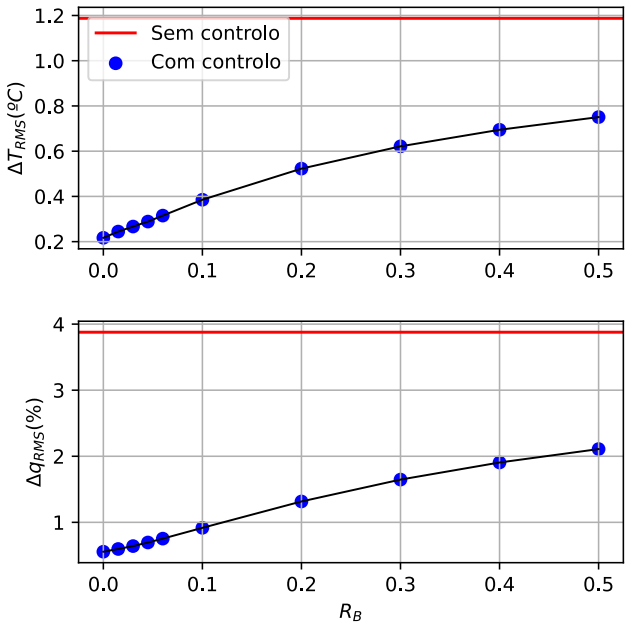


Figura 4.17: Consequência do valor do modelo de perdas (R_B) dos conversores no balanceamento da temperatura e do estado de carga. Com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0.5,0.5]

4.2.6 Tempos de simulação

Como se pretende que o sistema de controlo esteja a correr em tempo real num Raspberry Pi, procedeu-se à medição do seu desempenho temporal tendo-se obtido os resultados da tabela 4.7 onde para diferentes valores de N, obtiveram-se diferentes valores de tempo de processamento. Os testes terminaram em N=7 pois o valor máximo de simulação atingiu o limite máximo definido mas foi no entanto possível verificar o seu funcionamento num sistema embarcado.

Foram também realizados testes para quantificar as métricas de desempenho com base no valor de N e verificou-se que, aumentando este valor os benefícios são muito reduzidos. Isto deve-se a estar a ser considerado no controlador MPC que a corrente i_{out} é constante durante o horizonte de predição, o que resulta em resultados incorretos para horizontes grandes. Verificamos também que os resultados de esforço e perdas degradam-se com o aumento de N, isto porque, um horizonte superior aumenta a influência do custo J_{SC} ao aumentar os pontos da trajetória a seguir. Se a minimização do esforço e de perdas não fosse penalizada, então o estado de carga dos SC afastaria-se demasiado da trajetória e o seu custo no fim do horizonte de tempo seria muito superior aos restantes custos da função objetivo. Isto poderia ser contrariado diminuindo α_{SC}, mas tal como para as outras métricas, os benefícios seriam reduzidos.

4.3 Conclusão

Neste capítulo, o controlador de modelo preditivo foi testado e caracterizado por simulações. Foi possível analisar o seu comportamento para diferentes combinações de pesos na função objetivo e perceber os compromissos que existem. Nos testes realizados foi também possível estudar o comportamento do controlador, analisando os valores de corrente e potência. De seguida, o controlador foi testado para diferentes valores de capacidade dos SC e eficiência dos conversores, de modo a concluir quais seriam os valores das métricas esperados na protótipo de pequena escala. Por fim, como se pretende que o controlador esteja a correr num sistema embarcado, o funcionamento deste num Raspberry Pi 4B foi testado para diferentes dimensões do horizonte de tempo, tendo-se concluído que funciona corretamente.

Capítulo 5

Ensaios experimentais

Neste capítulo, realiza-se a caracterização das células que são usadas na plataforma de testes e é desenvolvido e implementado um algoritmo de estimação do estado de carga das células. De seguida, é testado e verificado o funcionamento do sistema de controlo desenvolvido nos capítulos anteriores.

5.1 Plataforma de testes

Com o propósito de validar o controlador procedeu-se ao seu teste num protótipo de pequena escala o qual está representado na figura 5.1. Nesta figura, os blocos a tracejado correspondem ao trabalho realizado na dissertação os quais consistem no controlador MPC a correr numa Raspberry Pi 4B e um estimador de estado de carga dos módulos de baterias e do módulo de SC programados numa DSP. A comunicação entre estes utiliza o protocolo UART e consiste na DSP transmitir periodicamente ao Raspberry Pi o estado atual do sistema e o Raspberry Pi responder com a referência da corrente de balanceamento.

Este protótipo corresponde ao da figura 5.2 que possui quatro componentes principais: as unidades de armazenamento de energia (as baterias e os SC), o circuito de balanceamento (constituído por conversores bidirecionais), duas unidades de controlo e o emulador da carga. As unidades de controlo consistem num DSP TMS320F28377S que controla os conversores bidirecionais com base em valores de referência e um Raspberry Pi 4B que gera os valores de referência. A unidades de armazenamento são constituídas por 16 SCs (Maxwell BCAP0310 P270 T10) numa disposição 2S8P e 10 células de Li-ion (LG 18650HG2) divididas em três módulos. Como representado na figura 5.3 o módulo #1 e o módulo #2 possuem três células e o módulo #3 possui quatro. Desta forma é possível emular desequilíbrios na capacidade, impedância interna e características térmicas que tipicamente resultam do envelhecimento das células.

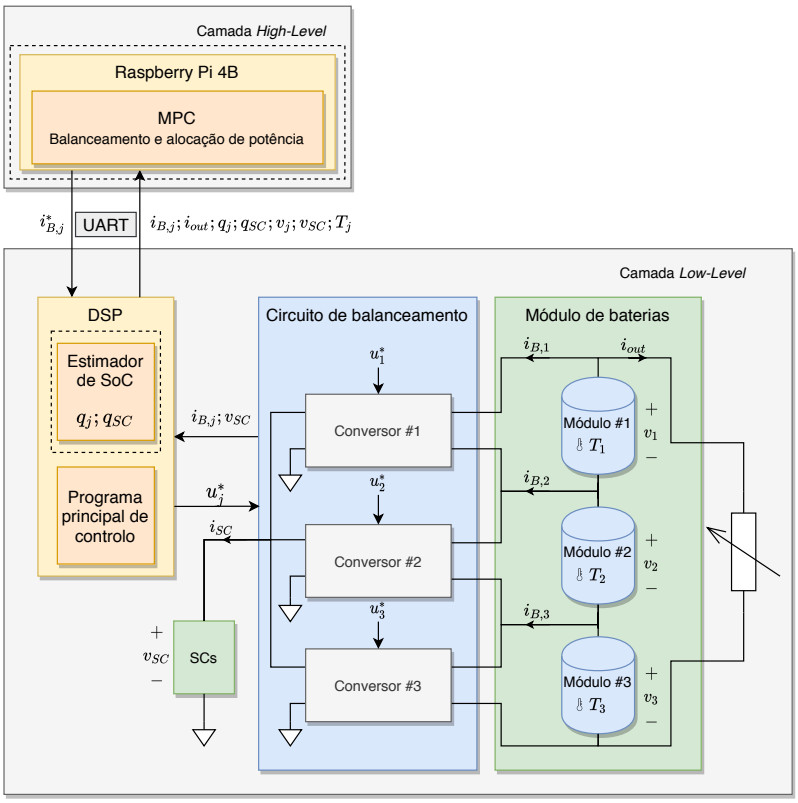


Figura 5.1: Diagrama de blocos do protótipo em pequena escala. Constituído por três módulos de baterias.

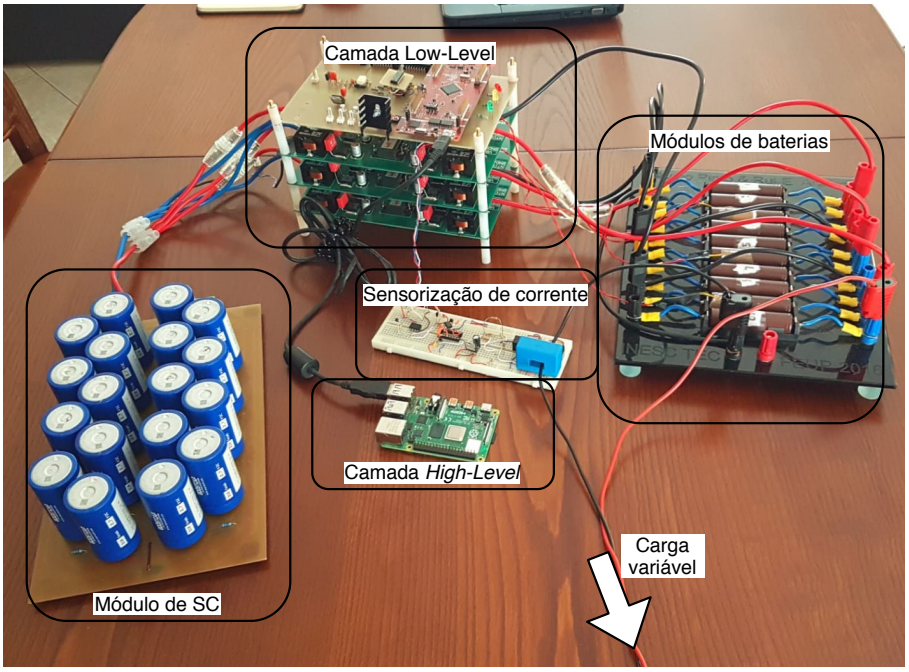


Figura 5.2: Protótipo em pequena escala do sistema híbrido de armazenamento de energia.

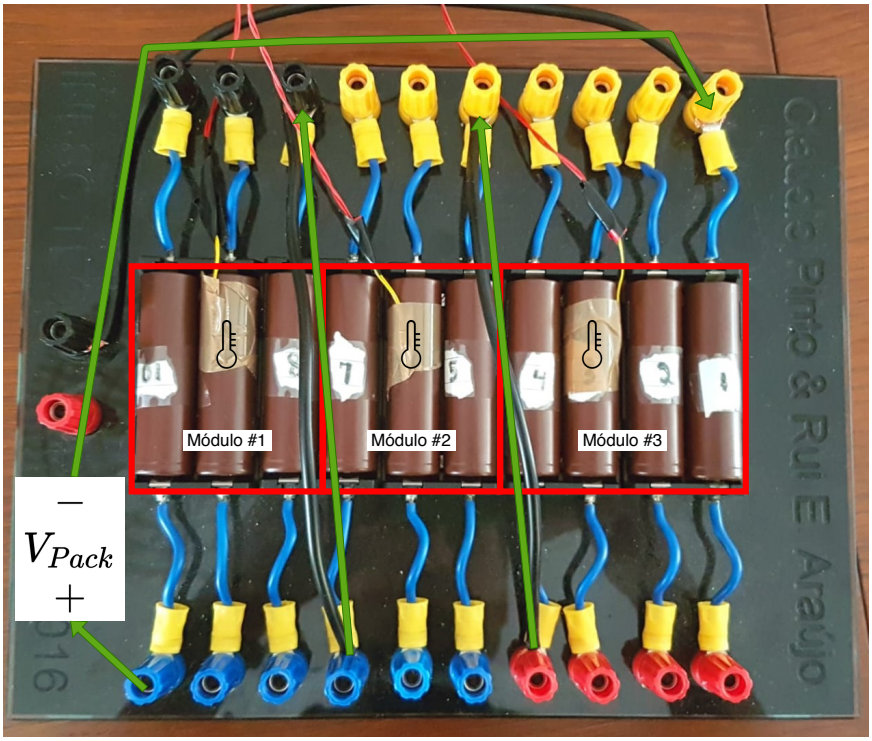


Figura 5.3: Módulo de baterias do protótipo em pequena escala. Constituído por 10 células divididas em 3 módulos.

5.2 Caracterização das células

Nesta secção pretende-se obter os parâmetros das células da figura 5.3 e obter o modelo da figura 2.12. Para isso, é necessário conhecer a capacidade nominal da célula, a curva OCV-SoC, a impedância interna desta e as suas características térmicas.

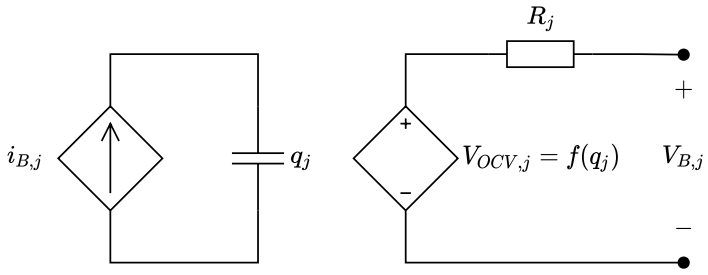


Figura 5.4: Modelo dinâmico simplificado de uma bateria [34].

Analisando a informação da célula fornecida pelo produtor [40], é possível concluir que quando eram novas possuíam uma capacidade nominal de aproximadamente 3000mAh. Com esta informação, procedeu-se à caracterização da célula realizando-se um teste com 10 ciclos de descarregamento. Isto é, a cada descarregamento, a célula perderá 10% da sua capacidade e com tempo de descanso entre cada descarregamento é possível obter o valor de OCV para esse estado de carga. Assumindo que a célula possui 3000mAh de capacidade serão então necessários dez

ciclos de descarregamento de 3A com uma duração de 6 minutos cada para descarregar completamente a célula. Com o teste realizado, obteve-se o gráfico da figura 5.5. No entanto, o teste teve de ser parado nos últimos 10% de SoC visto que a tensão não estava a ser mantida a valores seguros, e portanto para o resto desta dissertação, é considerado que as baterias possuem uma capacidade nominal de 2700mAh.

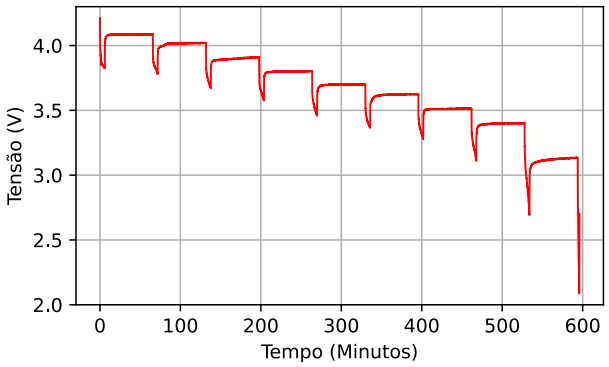


Figura 5.5: Ciclo de descarregamento efectuado para caracterizar as células.

Para o cálculo de R_j foi medido V_a no instante imediatamente antes da carga ser desligada e V_b no instante seguinte, 100ms depois (que é o período de aquisição), permitindo assim medir a queda de tensão e aplicar a equação 5.1. Um exemplo destes pontos pode ser encontrado na figura 5.6 onde foi ampliado o ciclo de descarga.

$$R_j = \frac{V_b - V_a}{I} \tag{5.1}$$

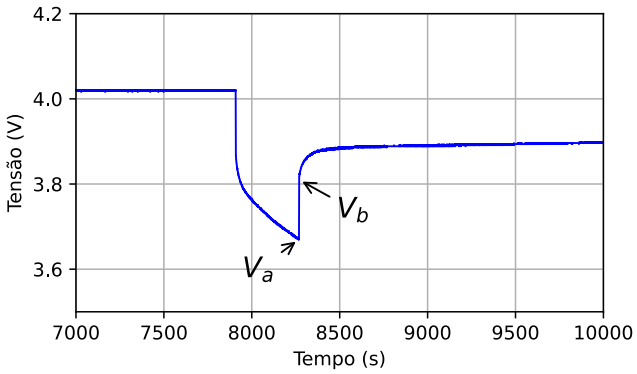


Figura 5.6: Ampliação do ciclo de descarregamento efectuado para caracterizar as células. Onde V_a é a tensão no instante imediatamente antes da carga ser desligada e V_b é no instante seguinte.

Este cálculo foi aplicado a todos os diferentes estados de SoC obtidos e foi depois feita uma média, tendo-se obtido o valor da resistência interna de 0.051Ω. Valor que é usado neste trabalho em todos os capítulos.

5.2.1 Caraterísticas térmicas das células

Aqui é desenvolvido e confirmado o modelo térmico usado no capítulo de modelação (3). O comportamento térmico das células pode ser modelado com base nas equações seguintes [17]

$$Q_{acc}[k] = Q_{gen}[k] - Q_{dis}[k] \tag{5.2}$$

$$Q_{acc}[k+1] = mC_p \frac{T_j[k+1] - T_j[k]}{T_s} \tag{5.3}$$

onde $\dot{Q}_{acc}$[W] representa a dinâmica de transferência de calor na célula, o que está relacionado com a temperatura desta pela equação 5.3, e resulta da diferença entre o calor gerado e dissipado na célula como representado na equação 5.2. O valor de m [kg] é a massa de cada célula, C_p [J/(kg.K)] é o calor especifico e T_j [K] é a temperatura da célula. Tal como em vários outros estudos [41, 42] o calor gerado nas células é descrito como as perdas internas nestas, e as restantes fontes de calor são negligenciadas resultando em

$$Q_{gen}[k] = R_j i_j^2[k] \tag{5.4}$$

Quanto ao calor dissipado, podem ser considerados três tipos de mecanismos: condução, convеção e radiação. Em vários estudos [41, 42] a energia dissipada por radiação não é considerada devido a esta ser relativamente baixa. Nesta dissertação, como na plataforma de testes as células estão afastadas entre si a energia transmitida entre módulos por condução também não é considerada, resultando apenas na transferência de calor por convecção para o ambiente circundante

$$Q_{dis}[k] = hA(T_j[k] - T_{env}) \tag{5.5}$$

onde, R_j é a resistência interna das células, h [W/(K.m^2)] é o coeficiente de transferência de calor da superfície da célula para o ambiente, A [m^2] é a área da célula e T_{env} [K] é a temperatura ambiente. Sabendo que a R_{cov} é igual a $(hA)^{-1}$ e mC_p resulta na capacidade térmica C_h, é possível deduzir a equação usada no capítulo 3 para a modelação do sistema,

$$\frac{T_j[k+1] - T_j[k]}{T_s} C_{h,j} = p_{l,j}[k] - \frac{T_j[k] - T_{env}}{R_{cov,j}} \tag{5.6}$$

Na tabela 5.1 são apresentados os parâmetros obtidos e que foram usados neste trabalho. Na figura 5.7, a temperatura medida num teste de descarregamento sem controlo na plataforma de teste é comparada com os valores calculados usando o modelo térmico para a mesma corrente i_j. Com base nesta figura é possível validar o modelo térmico desenvolvido.

5.3 Estimação do SoC

De modo a obter um valor de SoC dos módulos de baterias, foi implementado o método de contagem de coulomb usando a relação SoC-OCV para calibração.

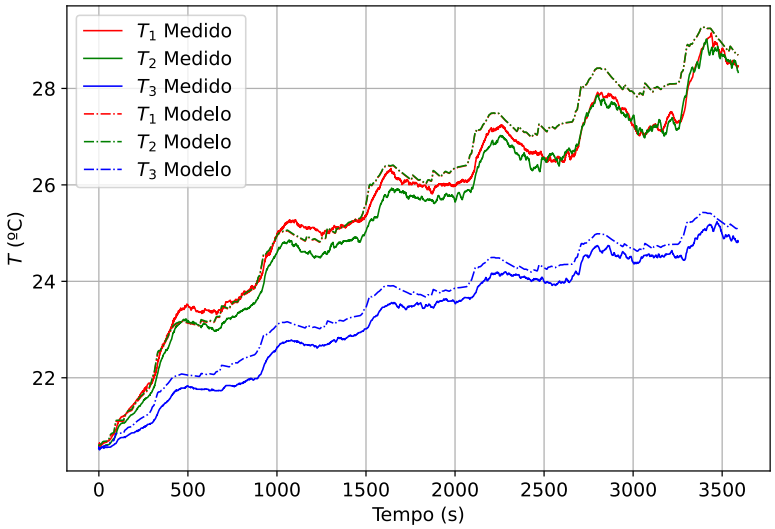


Figura 5.7: Temperatura medida nos módulos para seis ciclos de condução e a temperatura calculada pelo modelo térmico.

Tabela 5.1: Parâmetros elétricos e térmicos das células [17] [40].

Parâmetros relevantes dos módulos de baterias			
Variáveis	Símbolo	Valor	Unidade
Carga Nominal	$\overline{Q}$	2.7	Ah
Resistência interna	R	0.051	Ω
Capacidade térmica	$C_{h,j}$	41.6	J/K
Resistência por convecção	$R_{cov,j}$	41.1	K/W

Tabela 5.2: Estado de carga para diferentes valores de OCV.

Relação entre o SoC e a sua tensão OCV	
SoC_{OCV}	OCV
100.00%	4.200V
88.89%	4.087V
77.78%	4.019V
66.67%	3.909V
55.56%	3.802V
44.44%	3.700V
33.33%	3.624V
22.22%	3.511V
11.11%	3.402V
0%	3.134V

Estado de carga com base no OCV

A partir dos resultados obtidos nos ciclos de descarregamento da célula foi possível obter valores de estado de carga para os nove valores de tensão de circuito aberto medidos após descanso, resultando na tabela 5.2. Com estes valores, foram realizadas aproximações lineares entre os nove pontos de modo a obter o gráfico da figura 5.8. Assim, sempre que for necessário calcular um valor de SoC_{OCV}, o estimador calcula a reta entre os dois pontos de OCV mais próximos e aplica essa equação sobre o valor de OCV medido para obter o valor aproximado de SoC.

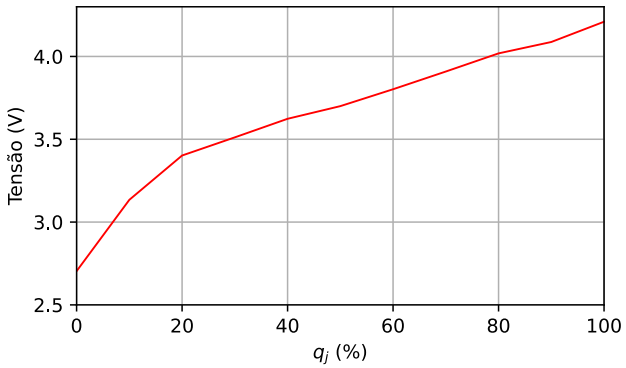


Figura 5.8: Curva OCV-SoC de uma célula (LG 18650HG2).

Contagem de Coulomb

Para realizar a estimação do estado de carga é realizado um ciclo com um período de 100ms, onde a cada iteração o sinal de corrente é adquirido e integrado de forma a obter a carga consumida ou carregada segundo a equação 5.7, em que T_s é o período de aquisição da corrente em segundos.

$$Q_j[k+1] = Q_j[k] + i_j[k]T_s \tag{5.7}$$

Algoritmo de estimação do SoC

Combinando estes conhecimentos, desenvolveu-se o algoritmo de estimação do SoC do fluxograma da figura 5.9. Quando o sistema arranca, é considerado que as baterias estiveram em descanso e é calculada a carga que foi consumida desde o seu último funcionamento e/ou carga que foi perdida por descarregamento próprio usando a tensão em circuito aberto. Após a inicialização, o sistema entra no ciclo de funcionamento normal, onde, após adquirir a corrente, pode seguir dois caminhos: se a corrente for diferente de zero então é aplicada a contagem de coulomb para obter a carga em movimento para depois calcular o SoC do módulo; Se a corrente for igual a zero por um período de tempo superior a vinte minutos e se a contagem de coulomb estiver a ser realizada com um estado de carga inicial de 100%, é calculado o SoC_{OCV} e usando a carga Q_j é calculada a carga nominal da célula para efeitos de calibração. Se o estado de carga inicial não for 100% então o SoC_{OCV} é usado para calibrar a contagem de coulomb alterando a carga Q_j estimada.

Testes de estimação do SoC

Neste teste pretende-se verificar o funcionamento do algoritmo de estimação. Para isso, as células foram carregadas até 100% da sua capacidade mas foi removida uma célula do módulo #1, reduzindo a capacidade nominal para aproximadamente 5.4Ah. Na figura 5.10 está representado o teste realizado. Inicialmente, o sistema não conhecia a capacidade nominal correta e, por isso o SoC estimado divergia do valor real. No instante $t = 1800$ quando a carga é desligada o algoritmo entra num estado de espera no qual aguarda que as células relaxem. Em $t = 3000$, como passaram os 20 minutos de descanso (tempo considerado suficiente por analise do gráfico da figura 5.5, onde, ao fim de 20 minutos o valor de OCV deixa de se alterar significativamente), o sistema calibrou e corrigiu a carga nominal da célula de 8.1Ah para 5.42Ah. Permitindo assim obter o estado de carga correto até ao final do teste.

Com isto, pretende-se manter um conhecimento atualizado do sistema de forma a que, mesmo com a degradação das baterias, seja possível realizar o balanceamento e gestão do sistema de armazenamento de energia.

5.4 Resultados experimentais do controlador MPC no Plataforma de testes

Nesta secção o controlador preditivo desenvolvido e calibrado nos capítulos anteriores foi testado no sistema da figura 5.2. Nestes testes, devido a limitações de *Hardware* não foi possível simular a corrente da travagem regenerativa, pelo que os resultados com minimização de esforço são inferiores aos que poderiam ser efetivamente obtidos. Pelos mesmos motivos, a resolução do ciclo de carga é também inferior e corresponde à figura 5.11.

Na tabela 5.3 são definidos os testes que são apresentados nesta secção. Ao contrário dos testes realizados nas simulações, nesta secção o valor de α_u e α_{SC} é alterado conforme o teste

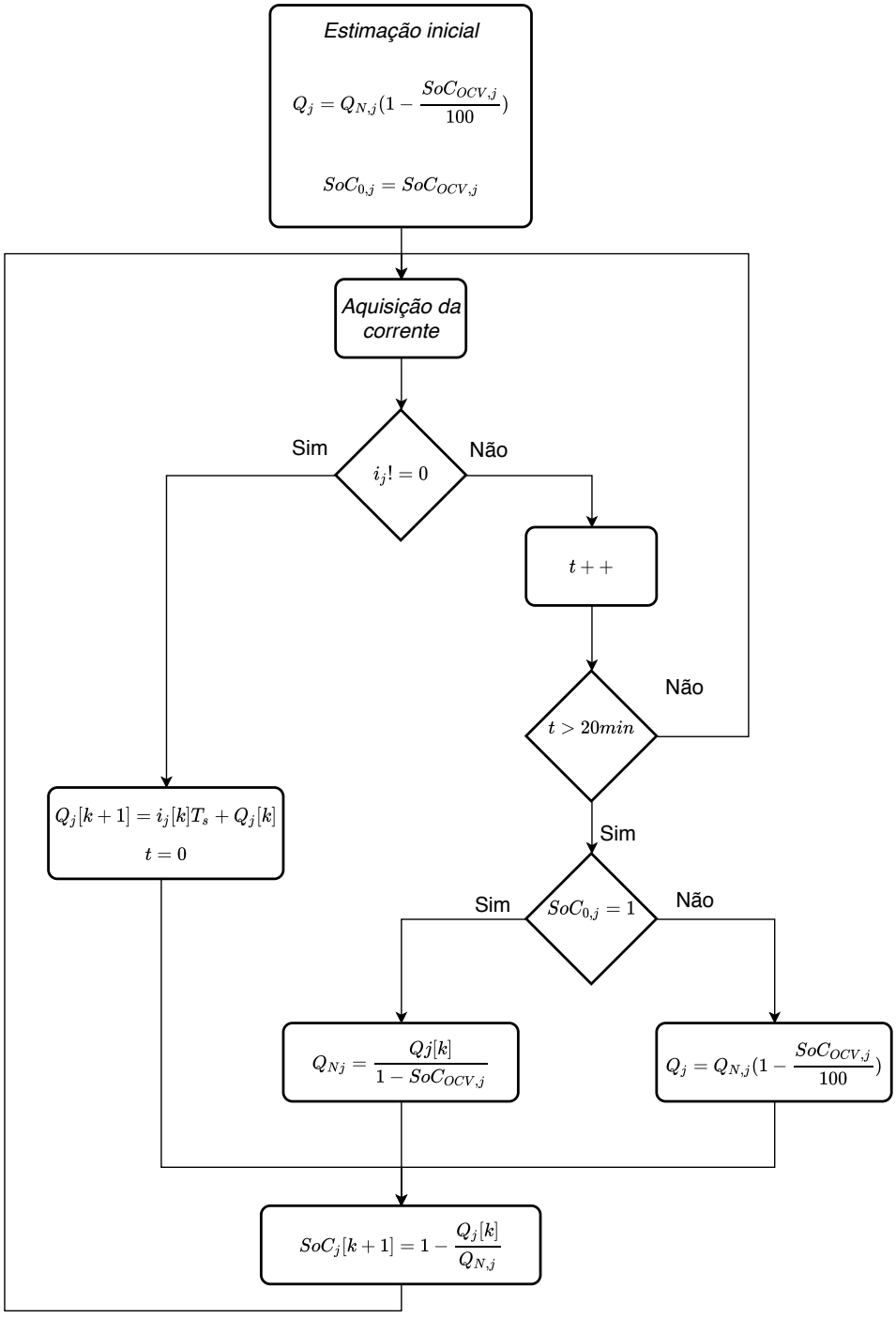


Figura 5.9: Diagrama de fluxo do algoritmo de estimação do estado de carga e carga nominal do módulo.

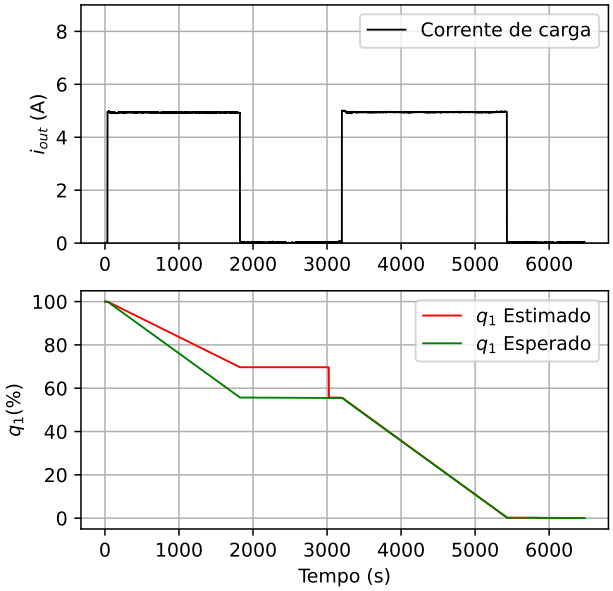


Figura 5.10: Teste de calibração. Estado de carga estimado pelo sistema e o que seria esperado obter, antes e depois da calibração no instante $t = 3000$.

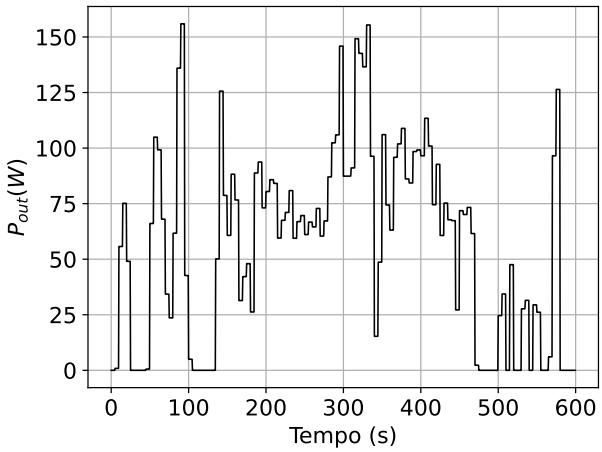


Figura 5.11: *Driving-Cycle* US06 escalado para ser compatível com o Plataforma de testes e o *Hardware* disponível.

Tabela 5.3: Pesos usados nos testes na plataforma de testes.

Sem balanceamento
$\alpha_q = 0$; $\alpha_T = 0$; $\alpha_s = 0$; $\alpha_l = 0$; $\alpha_u = 0.0$; $\alpha_{SC} = 0.5$
Balanceamento do SoC
$\alpha_q = 1$; $\alpha_T = 0$; $\alpha_s = 0$; $\alpha_l = 0$; $\alpha_u = 0.5$; $\alpha_{SC} = 0.5$
Balanceamento da temperatura
$\alpha_q = 0$; $\alpha_T = 1$; $\alpha_s = 0$; $\alpha_l = 0$; $\alpha_u = 0.5$; $\alpha_{SC} = 0.5$
Balanceamento do SoC e temperatura
$\alpha_q = 0.5$; $\alpha_T = 0.5$; $\alpha_s = 0$; $\alpha_l = 0$; $\alpha_u = 0.5$; $\alpha_{SC} = 0.5$
Balanceamento e minimização do esforço
$\alpha_q = 0$; $\alpha_T = 0$; $\alpha_s = 1$; $\alpha_l = 0$; $\alpha_u = 0.1$; $\alpha_{SC} = 0.1$
Balanceamento e minimização
$\alpha_q = 0.5$; $\alpha_T = 0.5$; $\alpha_s = 0.5$; $\alpha_l = 0.5$; $\alpha_u = 0.1$; $\alpha_{SC} = 0.1$

a ser realizado para, de melhor forma, acomodar as limitações da plataforma de testes. Como por exemplo, a inexistência de travagem regenerativa que implica um aumento de α_{SC} de forma a manter a carga dos SC nos níveis desejados, e o ruído inerente a um sistema real com sensores reais os quais poderiam, sem α_u, provocar variações bruscas na corrente de balanceamento. Foi removido o teste de apenas minimização de perdas pois, como foi concluído em 4.2.5, os conversores com $R_B = 0.3$, possuem uma eficiência demasiado baixa para permitir a minimização das perdas. Se esse teste fosse realizado, as correntes de balanceamento iriam permanecer nulas pois qualquer valor de $i_{B,j}$, iria apenas aumentar a energia perdida. No entanto, quando todos os tipos de controlo são combinados a minimização das perdas pode funcionar prejudicando as restantes métricas de forma a limitar a energia perdida, e portanto foi testado.

5.4.1 Parâmetros

Como, ao contrário das simulações, não é possível controlar todos os parâmetros que envolvem o sistema, foi necessário alterar alguns, nestes testes. O valor inicial do estado de carga foi alterado para ser 100%, pois assim o teste é iniciado após as células serem carregadas usando o equipamento adequado e lhes ser permitido um tempo de descanso. A temperatura ambiente é um parâmetro que varia durante e entre os vários testes, pelo que, podem ter comportamentos que não seriam de esperar. Um outro parâmetro que teve de ser alterado foi o modelo de perdas do conversor (R_B), este valor é muito superior ao valor de simulação e resulta da baixa otimização destes. Este valor foi estimado experimentalmente, medindo a corrente e a tensão em ambos os lados do conversor e calculando a potência perdida neste.

5.4.2 Resultados

Realizando os testes na plataforma experimental, obtiveram-se os resultados no anexo C e na tabela 5.5. No teste sem balanceamento e minimização do gráfico a) da figura C.1 é possível verificar que a corrente de balanceamento está bastante ruidosa quando comparado com os resultados obtidos em simulação. Isto deve-se à limitação mínima de corrente imposta nos conversores -

Tabela 5.4: Parâmetros elétricos e térmicos do sistema usados nos testes na plataforma de testes.

Parâmetros do HBS			
Variáveis	Símbolo	Valor	Unidade
Baterias			
SoC inicial	$q_{0,j}$	[100,100,100]	%
Carga Nominal	$\overline{Q}_j$	[8.1, 8.1, 10.3]	Ah
Resistência interna	R_j	[0.017, 0.017, 0.0129]	Ω
Supercondensadores			
SoC inicial	$q_{0,SC}$	100	%
Carga Nominal	$\overline{Q}_{SC}$	0.688	Ah
Resistência interna	R_{SC}	0.0022	Ω
Parâmetros térmicos			
Temperatura inicial	$T_{0,j}$	Temperatura ambiente	^{o}C
Capacidade térmica	$C_{h,j}$	[125, 125, 161]	J/K
Resistência por convecção	$R_{cov,j}$	[13.7,13.7,10.3]	K/W
Temperatura Ambiente	T_{env}	Varia com o teste	^{o}C
Circuito de balanceamento			
Modelo de perdas	R_B	0.3	Ω
Controlador			
Limites da corrente de bal.	$i_{B,j}$	$-5 \leq i_{B,j} \leq 5$	A
Limites de SoC.	q_j	$0 \leq q_j \leq 100$	%
Limites de SoC dos SC	q_{SC}	$0 \leq q_{SC} \leq 100$	%
Período de aquisição	T_s	0.5	s
Horizonte	N	3	[-]

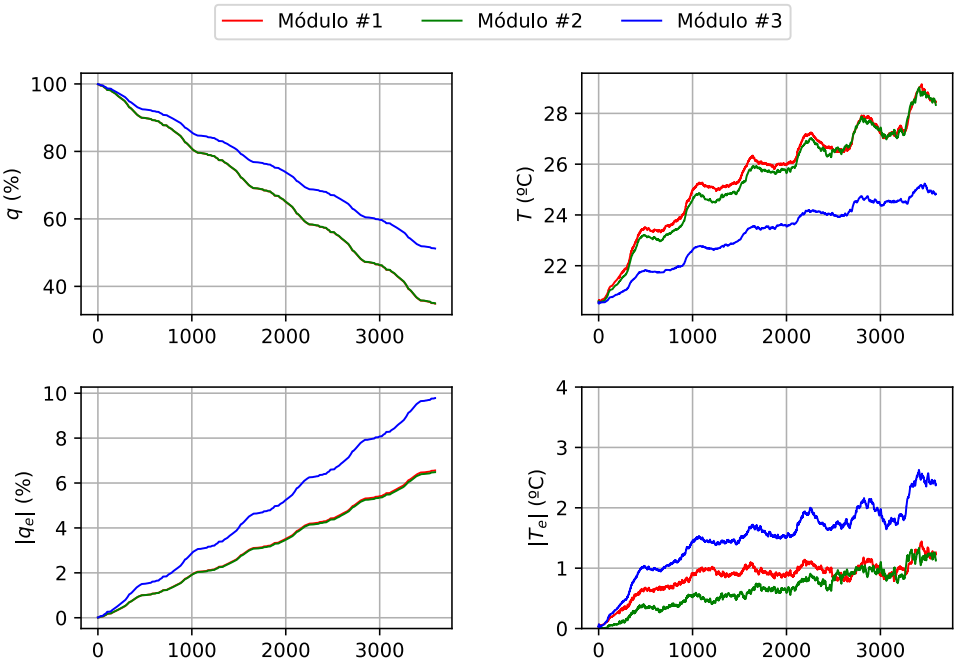


Figura 5.12: Resultados na plataforma de testes sem balanceamento e sem minimização. Onde $[\alpha_q, \alpha_T, \alpha_s, \alpha_l]$=[0,0,0,0].

como para manter o estado de carga dos SC no valor pretendido é necessário apenas um valor reduzido de corrente o controlador tem de compensar variando entre um valor acima do valor mínimo e zero, resultando num aspeto ruidoso. Na figura 5.12 encontramos o mesmo teste, estes gráficos permitem perceber as variações no estado de carga e na temperatura que serão de esperar no sistema de armazenamento de energia se não existir balanceamento.

Por análise dos gráficos b) e c) da figura C.1 é possível verificar que tal como na simulação o controlador foi capaz de realizar o balanceamento de estado de carga e de temperatura. No entanto, nestes testes na tabela 5.5 é também possível constatar que a baixa eficiência do conversor resultou em perdas totais muito superiores que, consequentemente, aumentaram a corrente de esforço de forma a manter a transferência de energia necessária, tal como seria de esperar a partir dos estudos em 4.2.5.

5.4.2.1 Balanceamento do estado de carga

O funcionamento do teste de balanceamento do estado de carga pode ser verificado na figura 5.13. Como este teste começa com o sistema balanceado não existe o regime transitório verificado nos testes no simulador, mas é no entanto evidente que tal como nas simulações, o módulo #3 que possui maior capacidade, está a ser descarregado por $i_{B,3}$ enquanto que os restantes módulos estão a ser carregados pela sua corrente de balanceamento.

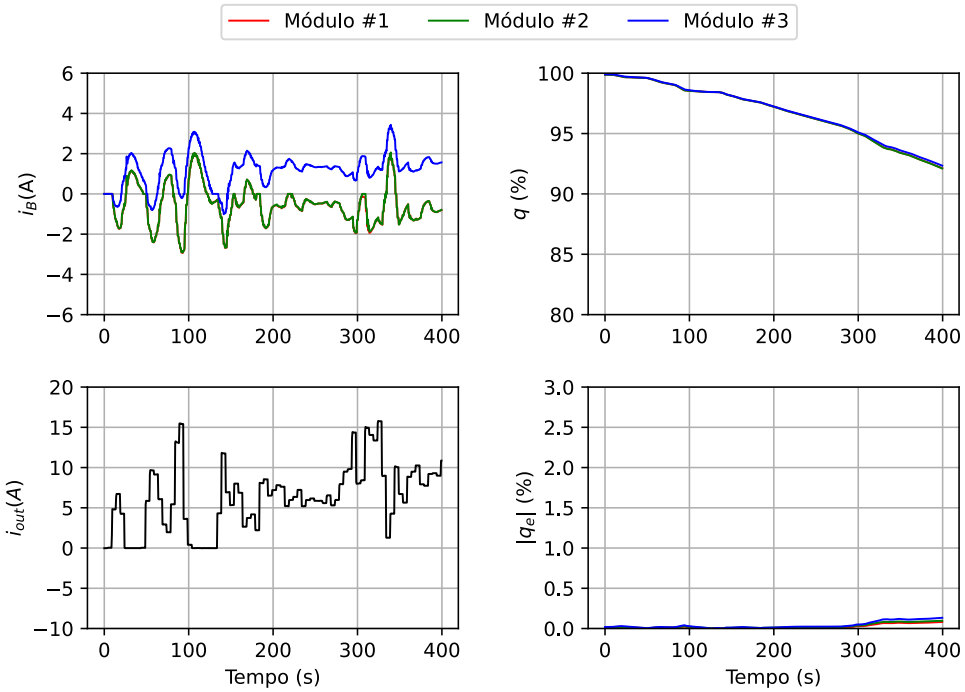


Figura 5.13: Resultados de balanceamento de estado de carga ampliado para $t \in [0, 400]$. Onde $[\alpha_q, \alpha_T, \alpha_s, \alpha_l]$=[1,0,0,0].

5.4.2.2 Balanceamento de temperatura

A figura 5.14 corresponde ao teste de balanceamento de temperatura e permite confirmar novamente os resultados obtidos em simulação. O módulo #3 como possui maior capacidade térmica possui também a maior corrente aos seus terminais (i_3) e o módulo #1 que possui uma temperatura ligeiramente superior é o que apresenta menor corrente aos seus terminais. Verificável na tabela 5.5 onde a corrente $i_{3,RMS}$ é muito superior às restantes e $i_{1,RMS}$ é a menor. Neste teste de balanceamento de temperatura é também visível uma grande interferência do valor de temperatura no módulo #1 que resulta de interferências com outros sinais ou até mesmo com os condutores do circuito de potência. No entanto, o sistema conseguiu manter estabilidade e realizar o balanceamento.

5.4.2.3 Minimização do esforço

É possível confirmar que a minimização do esforço tem o comportamento pretendido na figura 5.15, onde nos picos de corrente i_{out}, os SC ajudam a alimentar a carga de modo a diminuir o esforço nas células. No entanto, como não foi possível emular a travagem regenerativa, os SC são carregados usando apenas as células, o que, em conjunto com a baixa eficiência dos conversores, limita a capacidade de minimização do esforço - como é visível na tabela 5.5, onde as métricas de esforço foram apenas ligeiramente melhores que os valores obtidos sem balanceamento e minimização.

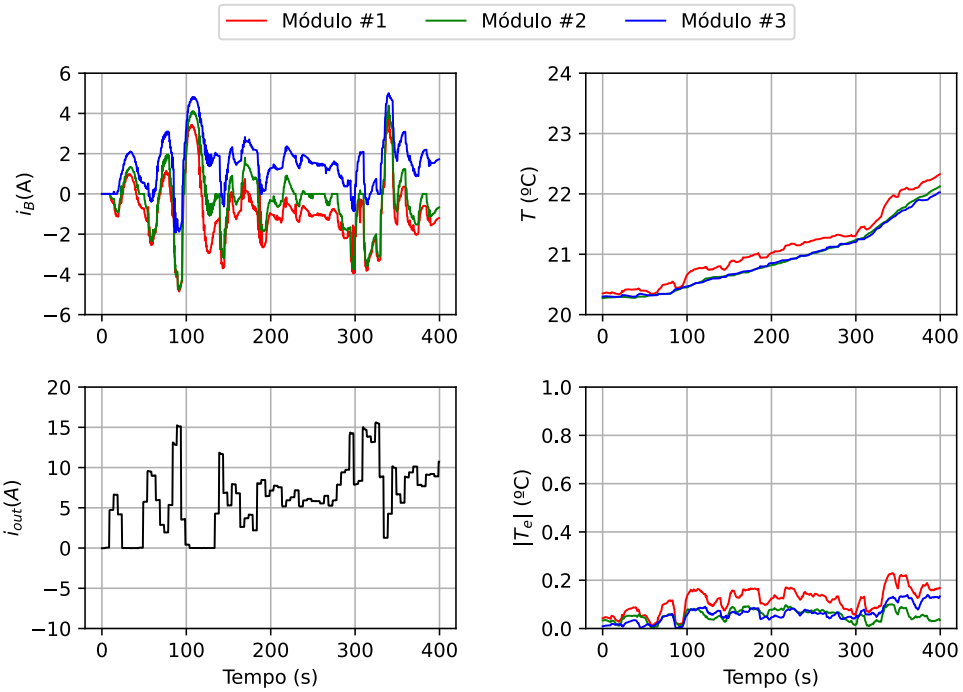


Figura 5.14: Resultados de balanceamento de temperatura ampliado para $t \in [0,400]$. Onde [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0].

5.4.2.4 Balanceamento e minimização

O gráfico da figura 5.16, o qual corresponde aos resultados da tabela 5.5 normalizados entre si, permite comparar visualmente todos os testes realizados. É então observável que, embora o balanceamento do estado de carga permita obter resultados bons no balanceamento de temperatura, o contrário não pode ser afirmado. O que se deve a interferências na leitura da temperatura, que induzem o sistema em erro (visível na figura 5.14 no módulo #1) o que provoca a diminuição da corrente i_1, que por fim origina um estado de carga deste módulo mais elevado no fim do teste comparado com os restantes. No teste de balanceamento de SoC e temperatura verifica-se um balanceamento equilibrado e com um baixo compromisso entre estas métricas, tal como nos resultados de simulação. Nesta figura, torna-se também evidente a perda na capacidade de balanceamento com a introdução da minimização do esforço e de perdas, comportamento que resulta da ineficiência do circuito de balanceamento, e que foi estudado na secção 4.2.5.

Devido às condições disponíveis, não foi possível realizar os testes em condições térmicas controláveis, acresce também, que devido ao carácter de protótipo do sistema, as células podem ter sido colocadas com um contacto ligeiramente diferente com o suporte e terminais elétricos nos vários testes, alterando o valor dos parâmetros térmicos e/ou da resistência R_j. Pelo que, a métrica T_{max}, não permite obter conclusões do desempenho do sistema. No entanto, observando a métrica i_{RMS} seria de esperar que os testes de minimização do esforço e de balanceamento e minimização obtivessem o melhor resultado de T_{max}.

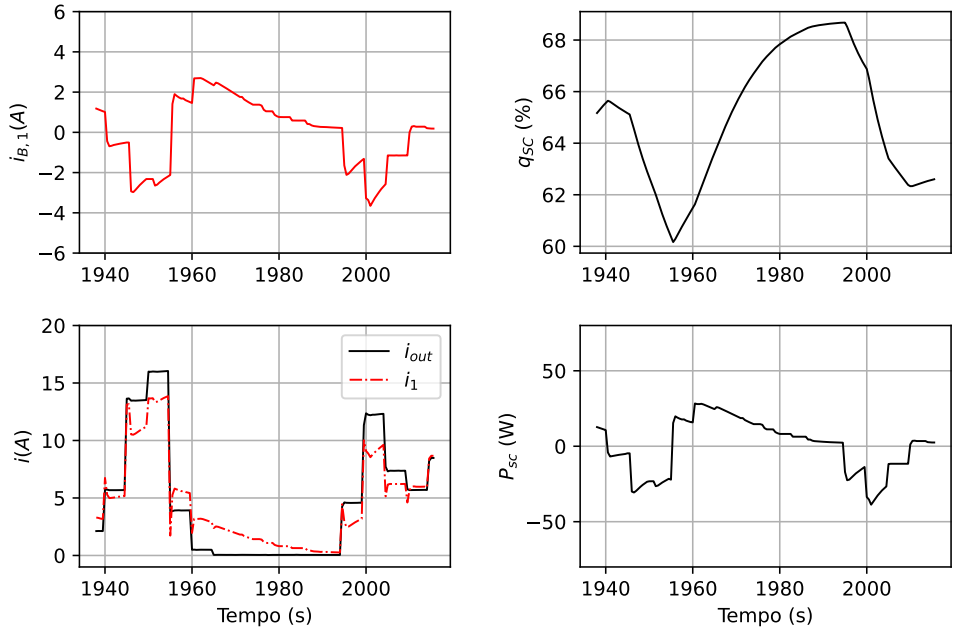


Figura 5.15: Resultados de minimização de esforço na célula #1 ampliado para $t \in [1938, 2015]$. Onde $[\alpha_q, \alpha_T, \alpha_s, \alpha_l]$=[0,0,1,0].

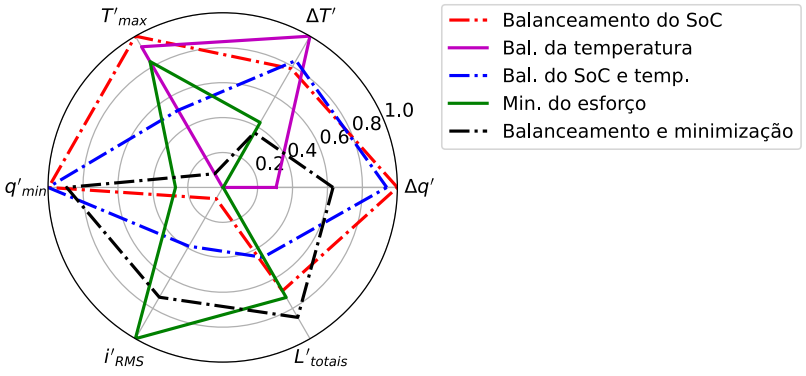


Figura 5.16: Todos os gráfico de radar dos resultados obtidos para os pesos definidos na tabela 4.3 combinados. O valor 1 corresponde ao melhor desempenho obtido e o valor 0 ao pior.

Tabela 5.5: Métricas de desempenho para os testes definidos na tabela 5.3 e realizados na plataforma de testes. Os valores a azul correspondem aos melhores valores nessa métrica nesta tabela.

	Métricas de desempenho					
	Sem bal. e min.	Bal. do SoC	Bal. da temperatura	Bal. do SoC e temp.	Min. do esforço	Bal. e minimização
Balanceamento						
Δq_{RMS}	4.38%	0.08%	3.06%	0.34%	4.36%	1.66%
ΔT_{RMS}	1.07°C	0.29 °C	0.08°C	0.24°C	0.65°C	0.71°C
Temperatura/SoC						
$T_{max} - T_{env}$	8.57°C	7.91°C	7.95°C	8.23°C	8.02°C	8.51°C
q_{min}	34.88%	38.07%	30.16%	38.09%	32.30%	37.24%
Esforço						
i_{RMS}	6.76A	6.91A	6.94A	6.79A	6.55A	6.66A
$i_{1,RMS}$	6.76A	6.37A	6.11A	6.12A	6.51A	6.32A
$i_{2,RMS}$	6.75A	6.38A	6.35A	6.13A	6.54A	6.39A
$i_{3,RMS}$	6.75A	8.01A	8.38A	8.13A	6.60A	7.27A
Perdas						
L_{total}	7839.56Ws	12387.81Ws	22227.38Ws	15579.80Ws	11762.46Ws	9869.14Ws
$L_{B,1}$	48.90Ws	1166.86Ws	3765.14Ws	1938.83Ws	1493.17Ws	679.48Ws
$L_{B,2}$	50.68Ws	1164.33Ws	2891.62Ws	2026.72Ws	1489.54Ws	593.53Ws
$L_{B,3}$	52.57Ws	2120.32Ws	7479.46Ws	3898.76Ws	1480.82Ws	1180.13Ws
L_{SC}	1.94Ws	29.30Ws	76.01Ws	54.80Ws	65.80Ws	20.43Ws

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusão

Os estudos realizados no âmbito do trabalho a que se refere a presente dissertação, tornaram possível um conjunto de aprendizagens complementares à formação obtida pela própria estrutura curricular do curso e permitiu também estabelecer um conjunto de conclusões gerais que são apresentadas neste capítulo.

No âmbito desta dissertação foi projetado um controlador para realizar o balanceamento do estado de carga e temperatura e, simultaneamente, fosse capaz de incorporar os benefícios dos SC no sistema de armazenamento. Desta forma, começou-se por estudar diferentes tipos de topologias de hibridação e balanceamento com o intuito de adquirir os conhecimentos necessários à realização deste trabalho. Com o modo de funcionamento da plataforma estudado, foram analisados os vários tipos de estimação do estado de carga e métodos de controlo usados na literatura.

Uma fase inicial do trabalho baseou-se no estudo da programação da DSP, no desenvolvimento de um circuito de leitura de corrente e na caracterização das células das baterias. Estas foram as bases necessárias ao desenvolvimento de um algoritmo de estimação do estado de carga, componente essencial e ponto de partida para o desenvolvimento do controlador. Com as componentes da plataforma experimental testados, o passo seguinte consistiu em estudar a ferramenta de otimização *GEKKO* e desenvolver um modelo dinâmico do sistema com base em valores obtidos experimentalmente ou por estimação, resultando num controlador preditivo de tempo real com um horizonte de predição. De forma a testar o controlador desenvolvido, foi criado um simulador com base no modelo previamente dimensionado e foram realizados vários testes com o intuito de analisar e caracterizar o desempenho do sistema. Por fim, com o controlador calibrado foram realizados testes no protótipo em pequena escala para confirmar os resultados obtidos por simulação. Os resultados obtidos mostraram que é possível melhorar globalmente o funcionamento do sistema de armazenamento de energia. Por um lado, demonstra-se que existe uma grande vantagem na utilização de supercondensadores, já que estes permitiram obter melhores resultados térmicos e diminuir o esforço nas baterias. Por outro lado, verificou-se também que o controlador revelou enorme liberdade, permitindo ao utilizador escolher entre uma combinação de quatro métodos

de funcionamento: i) balanceamento de temperatura; ii) balanceamento do estado de carga; iii) minimização do esforço das células; iv) minimização da energia perdida no sistema. Isto é, foi desenvolvido um controlador capaz de correr num sistema embarcado e que permite ao utilizador escolher entre uma combinação de vários tipos de controlo conforme os objetivos pretendidos. Por exemplo, se desejado, pode ser realizada uma combinação dos quatro tipos de controlo com diferente ênfase em cada, definindo os pesos de forma a cumprir as necessidades especificas de cada sistema de armazenamento.

Se as conclusões resumiram as principais ilações que retiramos dos trabalhos efetuados, o certo é que apesar do surgimento da doença COVID-19, foi possível realizar um trabalho experimental que corroborou em larga medida os resultados obtidos por simulação numérica.

6.2 Trabalho Futuro

Ao longo desta dissertação ocorreram vários problemas associados com a plataforma experimental que dificultaram o desenvolvimento da dissertação e que tiverem de ser corrigidos. No entanto, alguns destes permaneceram sem solução, pelo que sugere-se os seguintes trabalhos a desenvolver futuramente:

- **Otimização dos conversores bidirecionais:** A energia perdida nestes não permite obter bons resultados nas métricas de minimização da energia perdida e do esforço.
- **Otimização de ruído na medida de temperatura:** A sensorização de temperatura está muito susceptível a interferências.
- **Medição de i_{SC}:** Adicionar a capacidade de medição de corrente nos SC permitindo assim obter resultados mais fiáveis.
- **Previsão da corrente de carga:** Implementação do controlador MPC com previsão de corrente de carga para o horizonte de tempo considerado.

Referências

[1] EU. *Energy, transport and environment indicators*. 2016. URL: http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/7731525/KS-DK-16-001-EN-N.pdf/cc2b4de7-146c-4254-9521-dcbd6e6fafa6, doi:10.2785/138586.

[2] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, e Ali Emadi. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. CRC Press, 2 edição, 2010.

[3] Edison Electric Institute. Electric Vehicle Sales : Facts & Figures. páginas 1–4, 2018.

[4] Cedric D. Koolen e Gadi Rothenberg. Air Pollution in Europe. *ChemSusChem*, 12(1):164–172, 2019. doi:10.1002/cssc.201802292.

[5] IEA. Electric vehicle stock in the EV30@30 scenario. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-vehicle-stock-in-the-ev3030-scenario-2018-2030.

[6] IEA. Global EV Outlook 2019. Relatório técnico, Paris, 2019. URL: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019.

[7] Federico Baronti, Roberto Roncella, e Roberto Saletti. Performance comparison of active balancing techniques for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 267:603–609, 2014. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.05.007, doi:10.1016/j.jpowsour.2014.05.007.

[8] José M. Blanes, Roberto Gutiérrez, Ausìas Garrigós, José Luís Lizán, e Jesús Martínez Cuadrado. Electric vehicle battery life extension using ultracapacitors and an FPGA controlled interleaved buck-boost converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12):5940–5948, 2013. doi:10.1109/TPEL.2013.2255316.

[9] Changle Xiang, Yanzi Wang, Sideng Hu, e Weida Wang. A new topology and control strategy for a hybrid battery-ultracapacitor energy storage system. *Energies*, 7(5):2874–2896, 2014. doi:10.3390/en7052874.

[10] Ali Farzan Moghaddam e Alex Van Den Bossche. An Active Cell Equalization Technique for Lithium Ion Batteries Based on Inductor Balancing. *Proceedings of 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, ICMAE 2018*, páginas 274–278, 2018. doi:10.1109/ICMAE.2018.8467685.

[11] Cláudio Pinto. *Sizing and Energy Management of a Distributed Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles*. Tese de doutoramento, Faculty of Engineering of the University of Porto, 2017.

[12] Jian Cao e Ali Emadi. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(1):122–132, 2012. doi:10.1109/TPEL.2011.2151206.

[13] Farshid Naseri, Ebrahim Farjah, e Teymoor Ghanbari. An efficient regenerative braking system based on battery/supercapacitor for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles with BLDC motor. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(5):3724–3738, 2017. doi:10.1109/TVT.2016.2611655.

[14] Cláudio Pinto, Ricardo De Castro, Jorge V. Barreras, Rui Esteves Araújo, e David A. Howey. Smart balancing control of a hybrid energy storage system based on a cell-to-cell shared energy transfer configuration. *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2018 - Proceedings*, 2019. doi:10.1109/VPPC.2018.8604965.

[15] Ricardo Pinto de Castro, Claudio Pinto, Jorge Varela Barreras, Rui Esteves Araujo, e David Howey. Smart and Hybrid Balancing System: Design, Modeling and Experimental Demonstration. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, XX(XX):1–1, 2019. doi:10.1109/tvt.2019.2929653.

[16] Carl Bonfiglio e Werner Roessler. A cost optimized battery management system with active cell balancing for lithium ion battery stacks. *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, páginas 304–309, 2009. doi:10.1109/VPPC.2009.5289837.

[17] Claudio Pinto, Jorge V. Barreras, Erik Schaltz, e Rui Esteves Araujo. Evaluation of Advanced Control for Li-ion Battery Balancing Systems Using Convex Optimization. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(4):1703–1717, 2016. doi:10.1109/TSTE.2016.2600501.

[18] Sanjaka G. Wirasingha e Ali Emadi. Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, páginas 907–914, 2009. doi:10.1109/VPPC.2009.5289751.

[19] Farzad Rajaei Salmasi. Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007. doi:10.1109/TVT.2007.899933.

[20] Anthony M. Phillips, Miroslava Jankovic, e Kathleen E. Bailey. Vehicle system controller design for a hybrid electric vehicle. *IEEE Conference on Control Applications - Proceedings*, 1:297–302, 2000. doi:10.1109/cca.2000.897440.

[21] Shichuan Ding, Baolei Wei, Jun Hang, Peng Zhang, e Min Ding. A multifunctional interface circuit for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017*, 2017. doi:10.1109/ICEMS.2017.8056203.

[22] Rebecca Carter, Andrew Cruden, e Peter J. Hall. Optimizing for efficiency or battery life in a battery/supercapacitor electric vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(4):1526–1533, 2012. doi:10.1109/TVT.2012.2188551.

[23] Sirous Tavakol Sisakat e S. Masoud Barakati. Fuzzy energy management in electrical vehicles with different hybrid energy storage topologies. *4th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems, CFIS 2015*, páginas 1–6, 2016. doi:10.1109/CFIS.2015.7391671.

[24] Jens C. Schroeder e Friedrich W. Fuchs. Design of a powermanagement for a battery buffer system in an electric lift truck by means of fuzzy control and genetic algorithm. *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2011*, páginas 1–10, 2011.

[25] Sadam Hussain, Muhammad Umair Ali, Gwan Soo Park, Sarvar Hussain Nengroo, Muhammad Adil Khan, e Hee Je Kim. A real-time bi-adaptive controller-based energy management system for battery–supercapacitor hybrid electric vehicles. *Energies*, 12(24), 2019. doi:10.3390/en12244662.

[26] André Augusto Ferreira, José Antenor Pomilio, Giorgio Spiazzi, e Leonardo de Araujo Silva. Energy management fuzzy logic supervisory for electric vehicle power supplies system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(1):107–115, 2008. doi:10.1109/TPEL.2007.911799.

[27] Mathwork. Understanding Model Predictive Control - MATLAB & Simulink. URL: https://www.mathworks.com/videos/series/understanding-model-predictive-control.html.

[28] Eduardo Camacho e Carlos Alba. *Model Predictive Control in the Process Industry*. Springler-Verlag, London, 1 edição, 1995. URL: https://link.springer.com/book/10.1007{%}2F978-0-85729-398-5.

[29] Sandro Augusto Costa Magalhães. *Controlo das trajetórias de um robô móvel de alto desempenho*. Tese de doutoramento, 2018. URL: http://hdl.handle.net/10216/113380.

[30] Carlos E García, David M Prett, e Manfred Morari. Model predictive control: Theory and practice—A survey. *Automatica*, 25(3):335–348, 1989. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109889900022, doi:https://doi.org/10.1016/0005-1098(89)90002-2.

[31] Chao Wei, Xitao Wu, e Sicheng Liu. Study on MPC-based Energy Management for a Series Tracked Vehicle. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2019-June:1898–1902, 2019. doi:10.1109/ISIE.2019.8781404.

[32] Agus Purwadi, Arwindra Rizqiawan, Andre Kevin, e Nana Heryana. State of charge estimation method for lithium battery using combination of coulomb counting and adaptive system with considering the effect of temperature. *Proceedings - ICPERE 2014: 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy 2014*, páginas 91–95, 2014. doi:10.1109/ICPERE.2014.7067233.

[33] S. J. Lee, J. H. Kim, J. M. Lee, e Bo H. Cho. The state and parameter estimation of an Li-Ion battery using a new OCV-SOC concept. *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, páginas 2799–2803, 2007. doi:10.1109/PESC.2007.4342462.

[34] Fereshteh Poloei, Amirhosein Akbari, e Yan Fei Liu. A Moving Window Least Mean Square Approach to State of Charge Estimation for Lithium Ion Batteries. *Proceedings - 2019 IEEE 1st Global Power, Energy and Communication Conference, GPECOM 2019*, páginas 398–402, 2019. doi:10.1109/GPECOM.2019.8778563.

[35] Fabio Codecà, Sergio M. Savaresi, e Vincenzo Manzoni. The mix estimation algorithm for battery state-of-charge estimator - Analysis of the sensitivity to measurement errors. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, (January):8083–8088, 2009. doi:10.1109/CDC.2009.5399759.

[36] Venu Sangwan, Rajesh Kumar, e Akshay Kumar Rathore. State-of-charge estimation for Li-ion battery using extended Kalman filter (EKF) and central difference Kalman filter (CDKF). *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2017*, 2017-Janua:1–6, 2017. doi:10.1109/IAS.2017.8101722.

[37] Logan D.R. Beal, Daniel C. Hill, R. Abraham Martin, e John D. Hedengren. GEKKO optimization suite. *Processes*, 6(8), 2018. doi:10.3390/pr6080106.

[38] Logan Beal e John Hedengren. Model Building Functions — GEKKO 0.2.6 documentation, 2019. URL: https://gekko.readthedocs.io/en/latest/model{_}methods.html{#}model-building.

[39] EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Dynamometer Drive Schedules | Vehicle and Fuel Emissions Testing, 2018. URL: https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules.

[40] LG. PRODUCT SPECIFICATION Revision History Revision Date Originator Description. Relatório técnico, 2014. URL: http://www.lgchem.com.

[41] Ji Chun Zhao, Shi Hong Liu, e Jun Feng Zhang. Personalized distance learning system based on sequence analysis algorithm. *International Journal of Online Engineering*, 11(7):33–36, 2015. doi:10.3991/ijoe.v11i7.4764.

[42] Lijun Gao, Shengyi Liu, e Roger A. Dougal. Dynamic lithium-ion battery model for system simulation. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25(3):495–505, 2002. doi:10.1109/TCAPT.2002.803653.

Anexo A

Gráficos completos dos testes de simulação sem hibridação

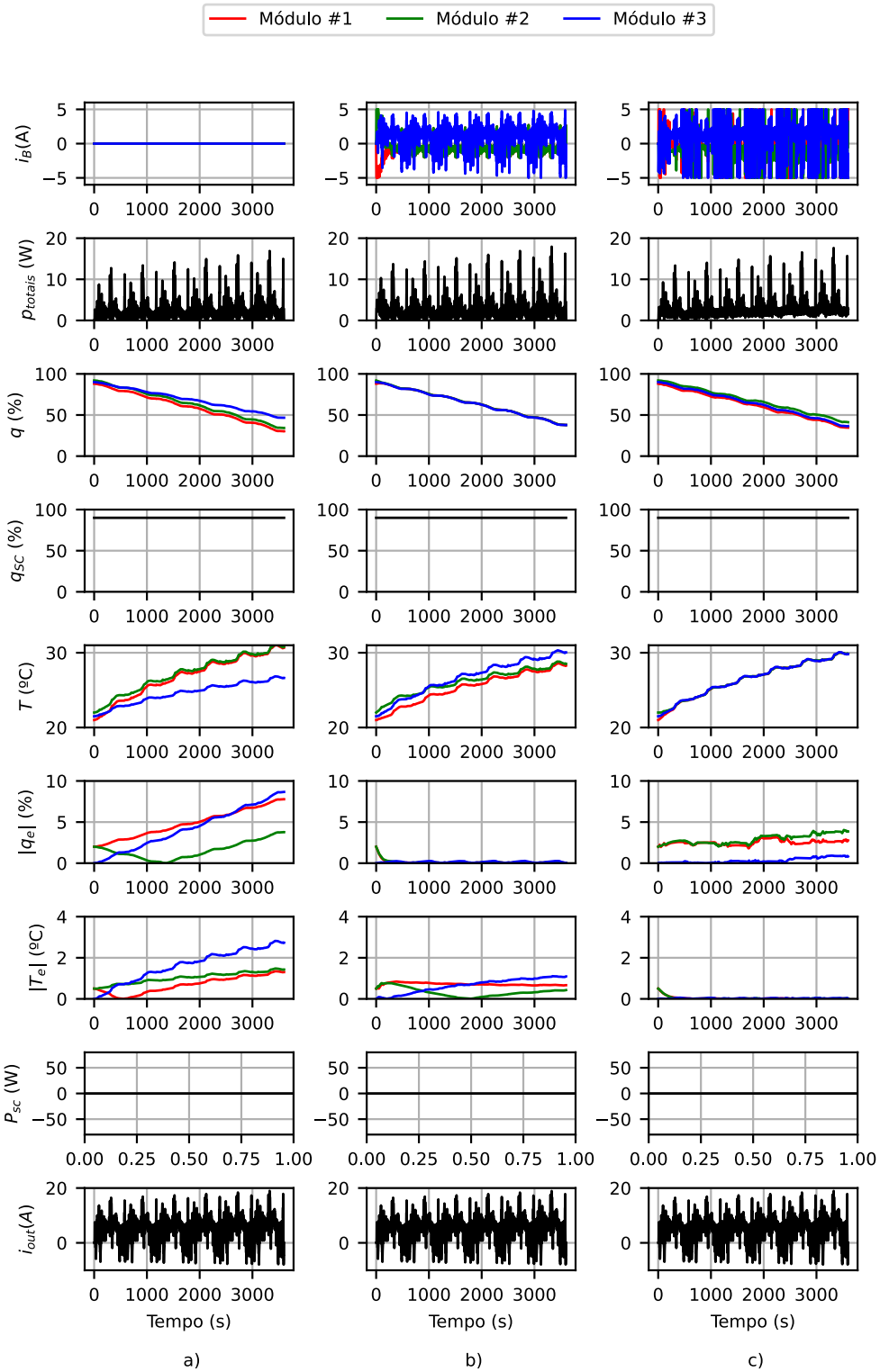


Figura A.1: Resultados para seis ciclos de condução sem hibridação. a) Sem balanceamento e minimização. b) Balanceamento do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0] c) Balanceamento da temperatura com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0].

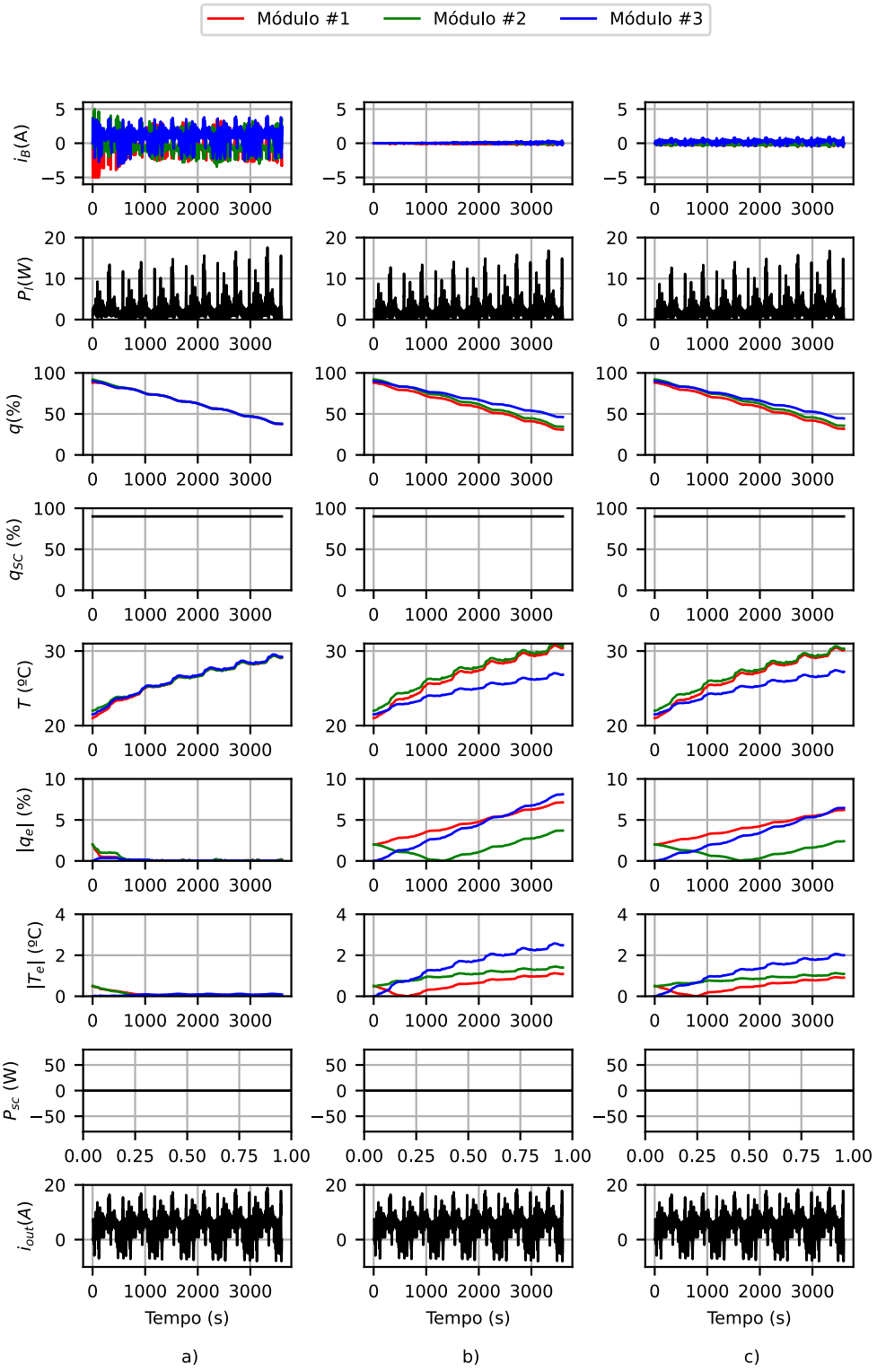


Figura A.2: Resultados para seis ciclos de condução sem hibridação. a) Balanceamento da temperatura e do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0,0]. b) Minimização do stress com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,1,0]. c) Minimização das perdas com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,0,1].

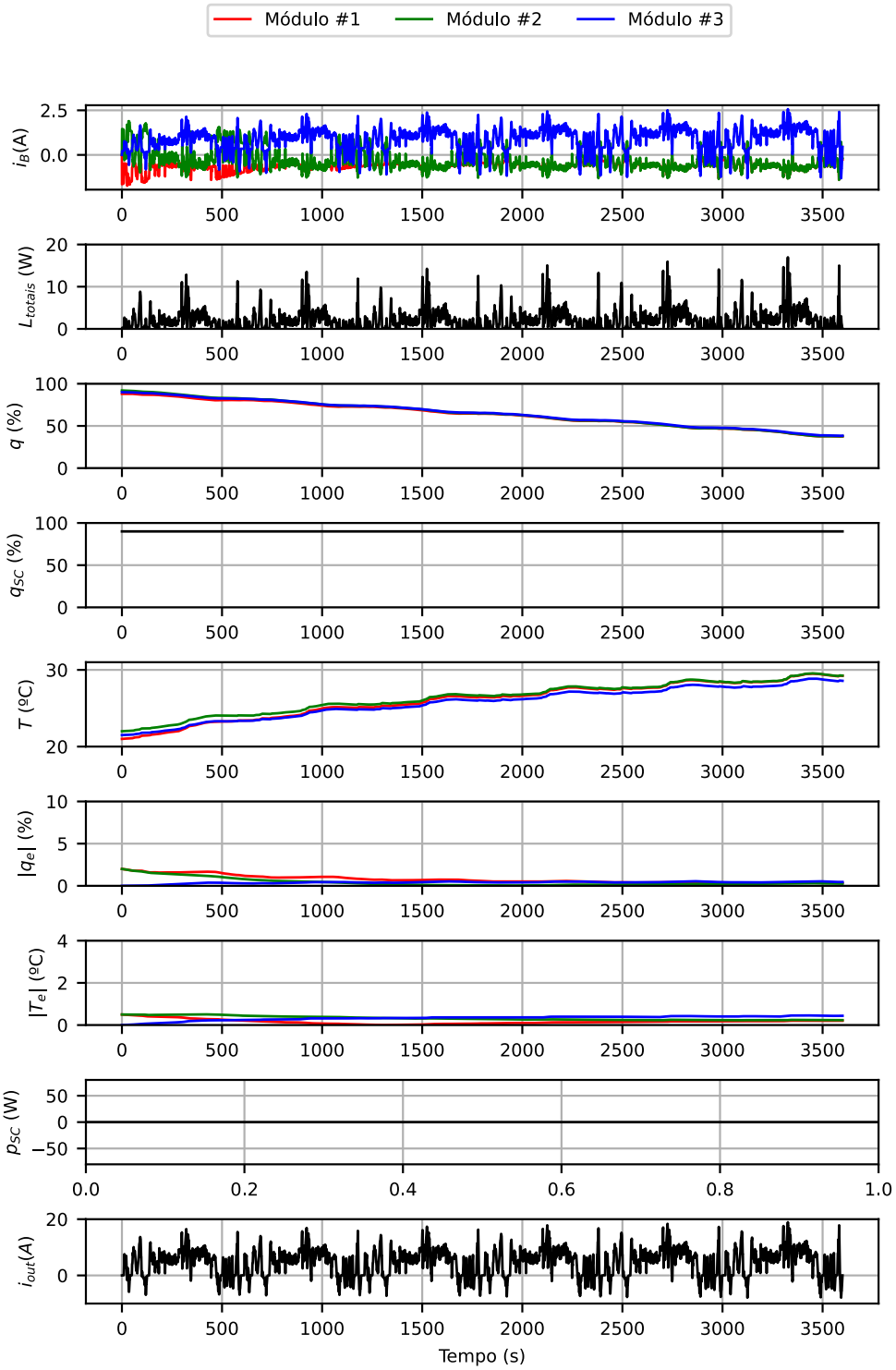


Figura A.3: Resultados para seis ciclos de condução sem hibridação. Simulação com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0.5,0.5]

Anexo B

Gráficos completos dos testes de simulação com hibridação

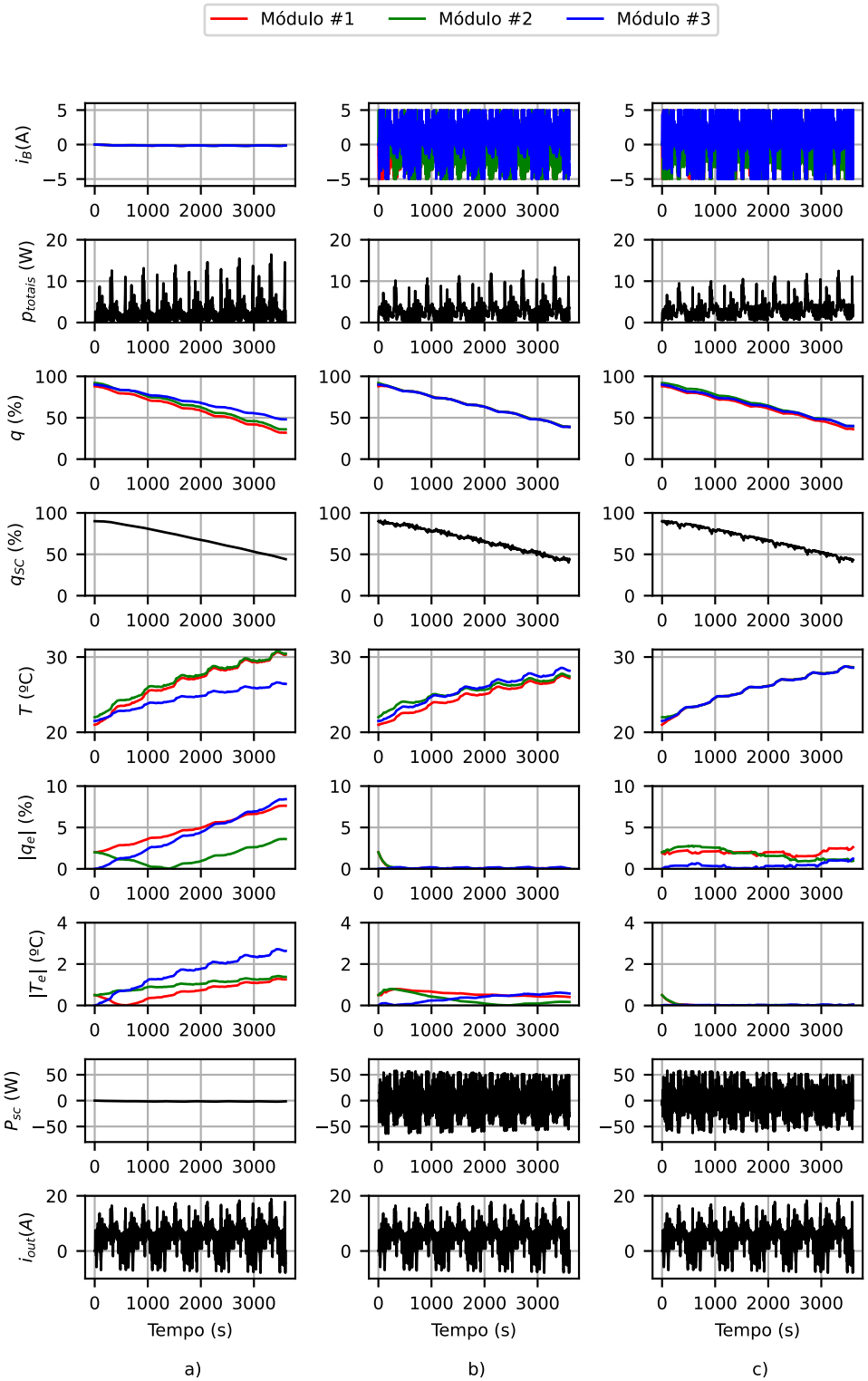


Figura B.1: Resultados para seis ciclos de condução. a) Sem balanceamento e minimização. b) Balanceamento do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0] c) Balanceamento da temperatura com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0].

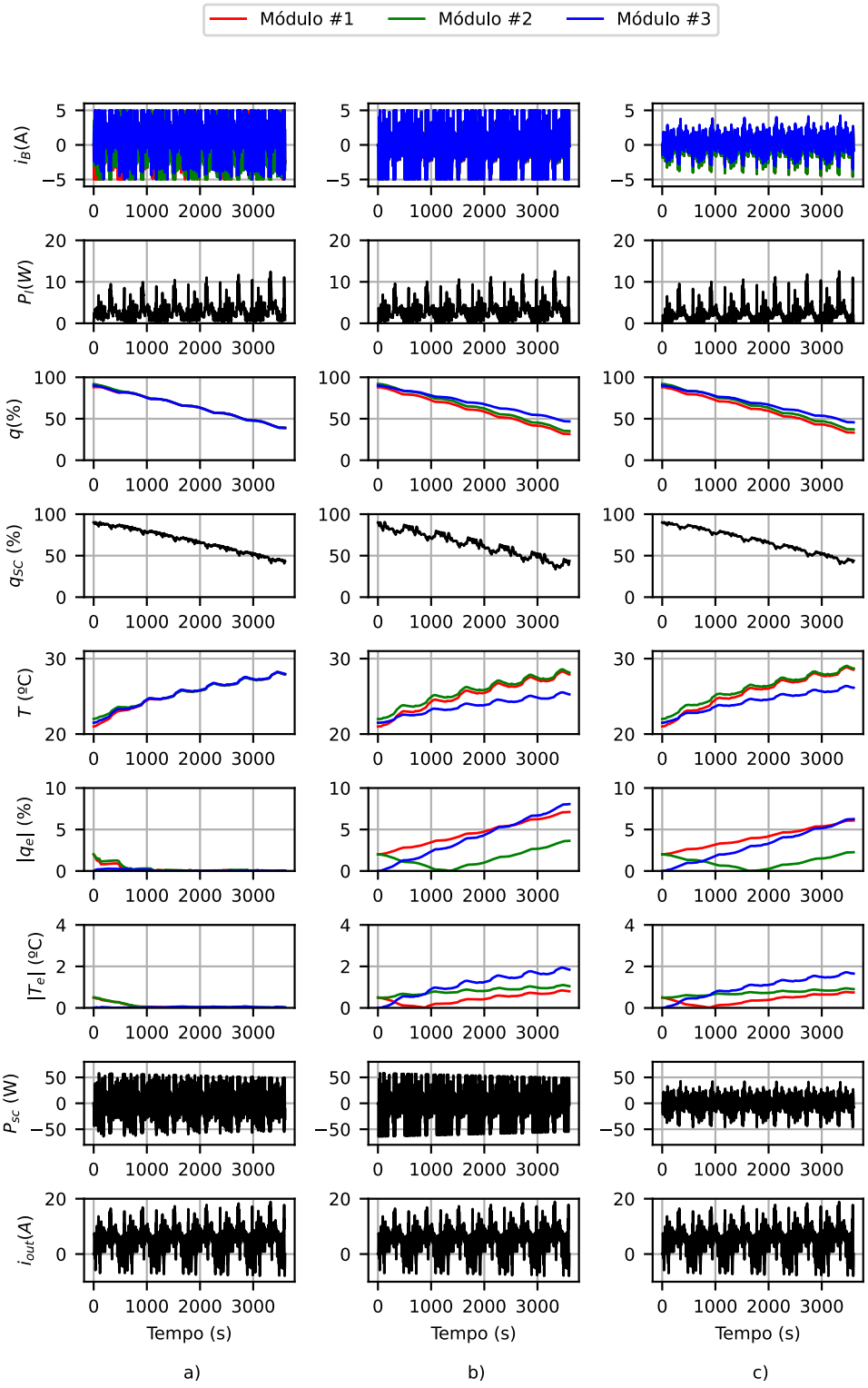


Figura B.2: Resultados para seis ciclos de condução. a) Balanceamento da temperatura e do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0.5,0.5,0,0]. b) Minimização do stress com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,1,0]. c) Minimização das perdas com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,0,1].

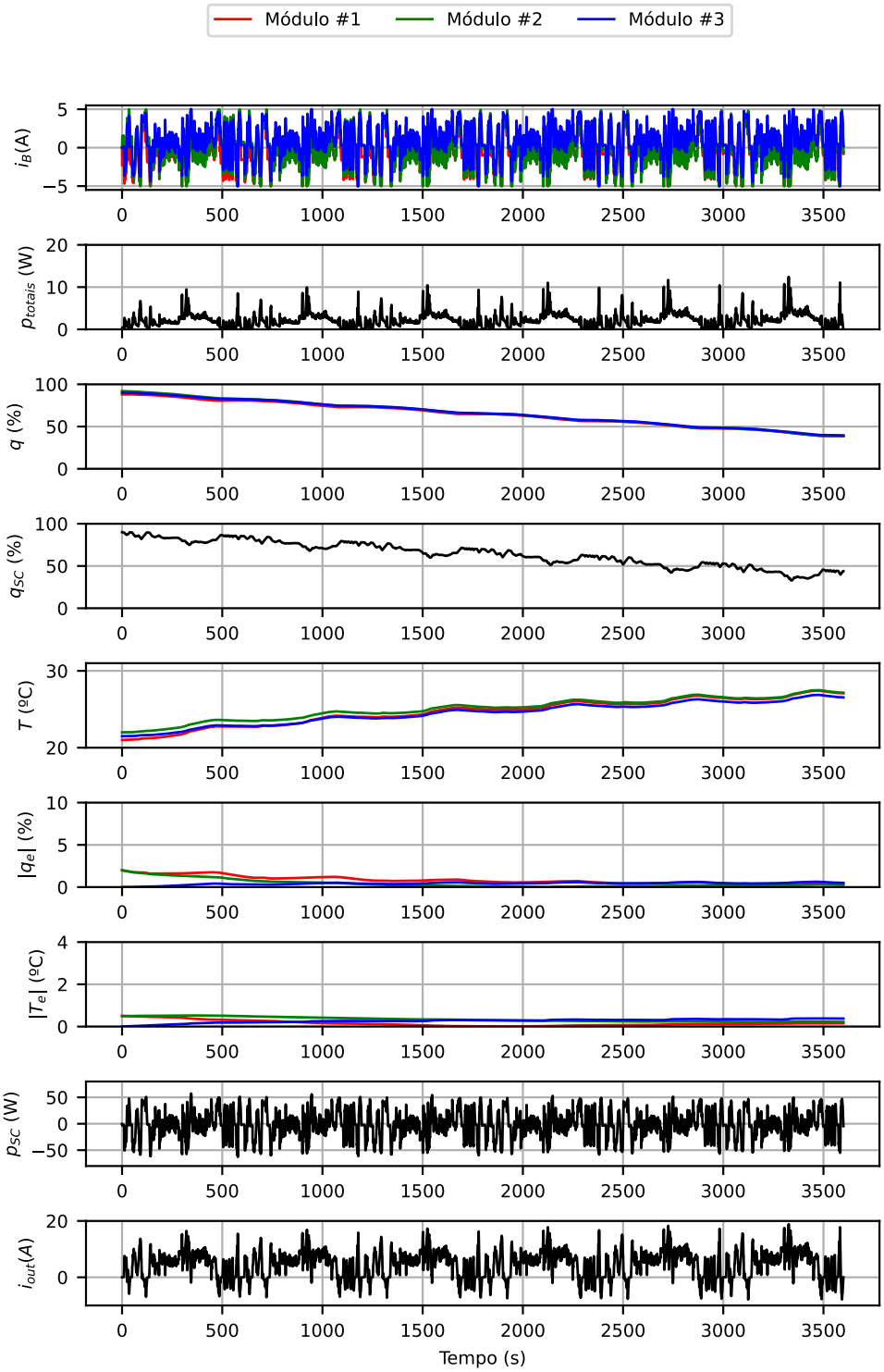


Figura B.3: Resultados para seis ciclos de condução. Simulação com $[\alpha_q, \alpha_T, \alpha_s, \alpha_l]$ = [0.5,0.5,0.5,0.5]

Anexo C

Gráficos completos dos testes na plataforma de testes

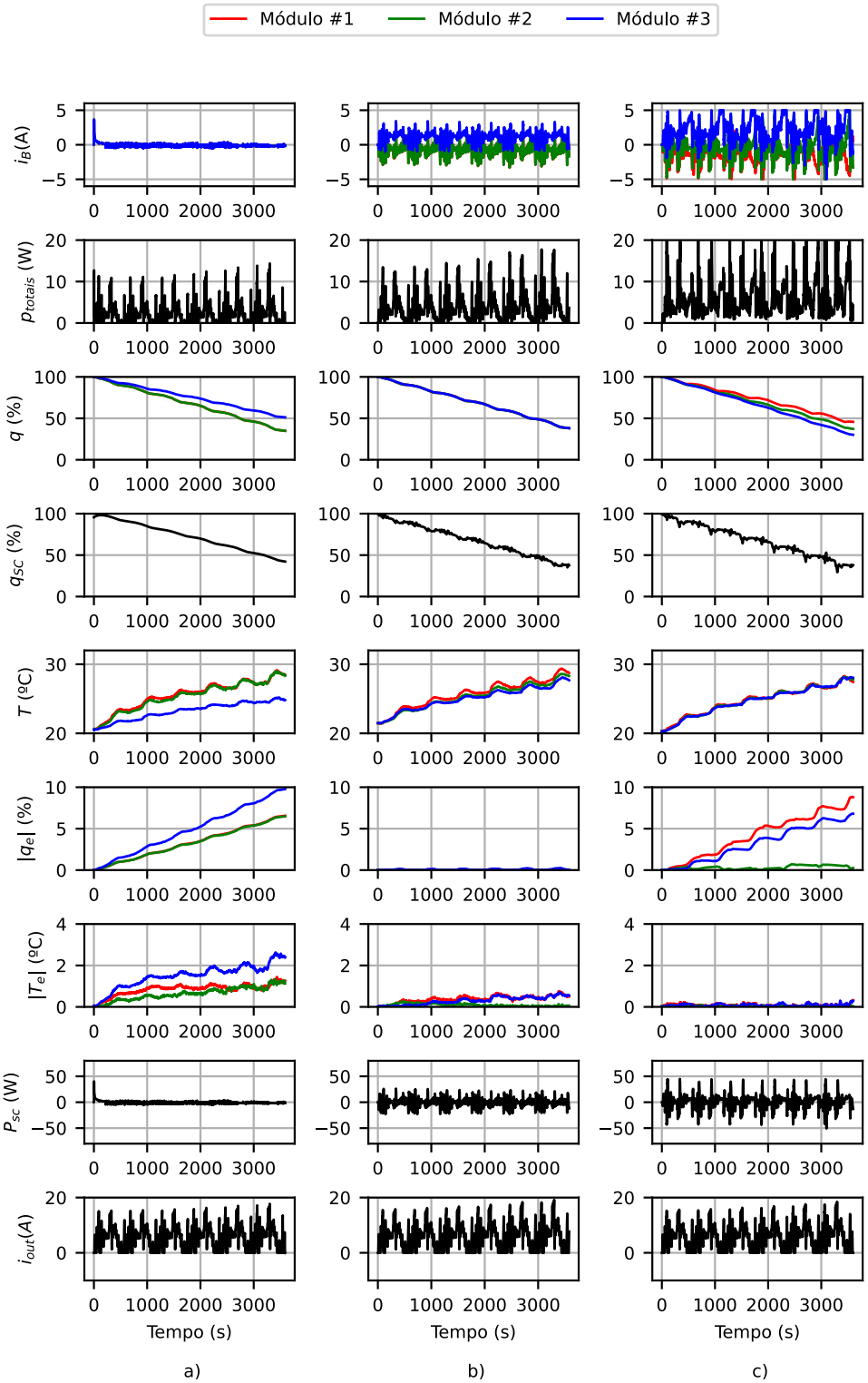


Figura C.1: Resultados para seis ciclos de condução. a) Sem balanceamento e minimização. b) Balanceamento do SoC com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[1,0,0,0] c) Balanceamento da temperatura com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,1,0,0].

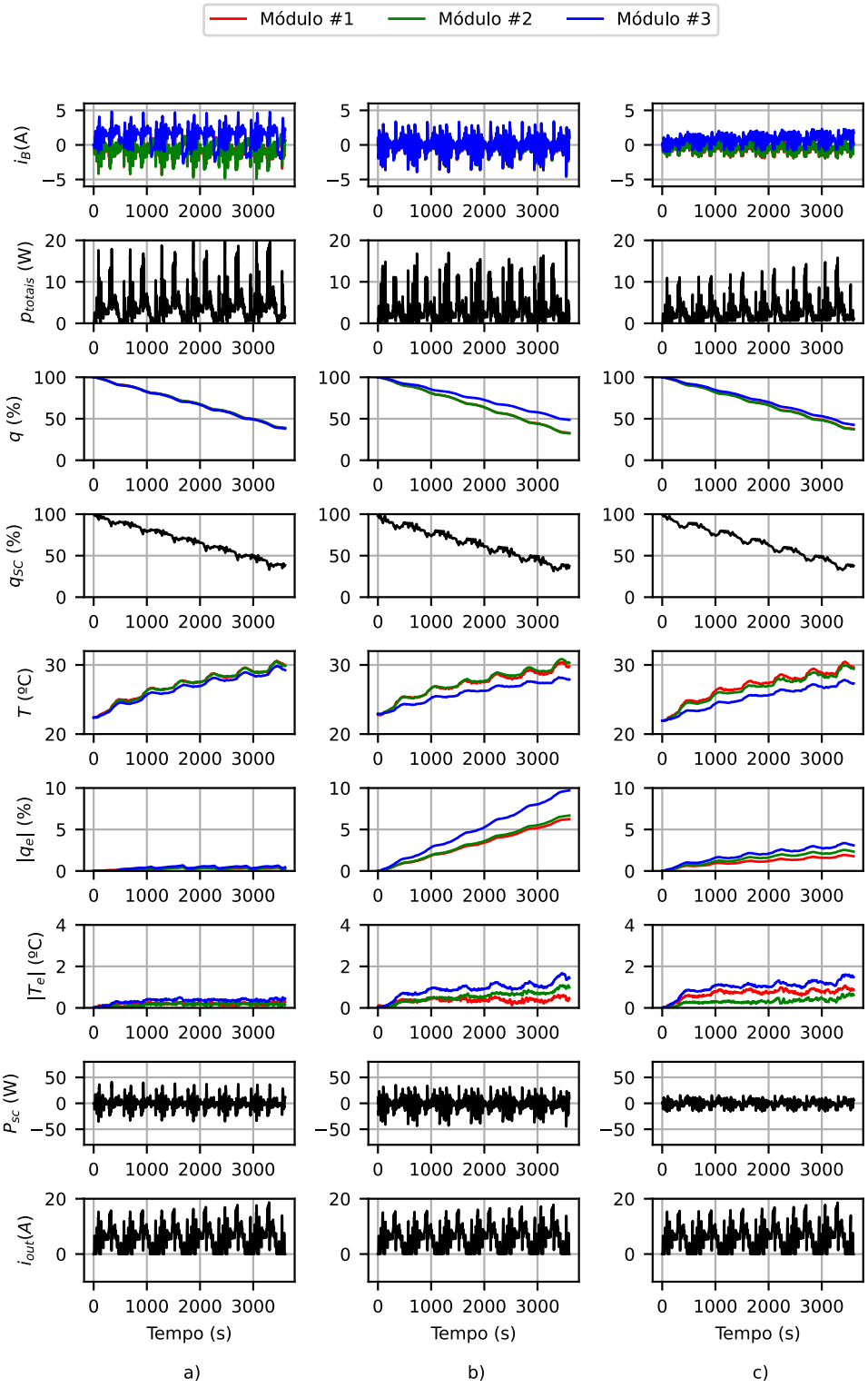


Figura C.2: Resultados para seis ciclos de condução. a) Balanceamento de SoC e temperatura com [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0.5,0.5,0] b) Minimização do esforço. [α_q, α_T, α_s, α_l]=[0,0,1,0] c) Balanceamento e minimização [α_q, α_T, α_s, α_l] =[0.5,0.5,0.5,0.5].

Anexo D

Implementação em Python do MPC

```
import numpy as np
from gekko import GEKKO
import json

class pyControl:
  # Imprimir valores do MPC (Resultados e estatisticas)
  debug = True

  #valores temporarios. Sao substituidos no arranque pelos primeiros valores
    medidos
  Temp=[21, 21, 21]
  Ta = 21
  SOC=[100,100,100]
  SOC_VSC=np.array([100])


  ##################
  ## Init do MPC ##
  ##################
  m = GEKKO(name='balancing-mpc', remote=False)
  m.solver_options = ['max_cpu_time 0.45'] # Tempo maximo de processamento


  #### Pesos [0,1] ##################
  alpha_u = 0.5
  alpha_losses = 0.0
  alpha_soc = 0.5
  alpha_temp = 0.5
  alpha_stress = 0.5
  alpha_socSC = 0.5
  ###################################


  #### desnormalizacao dos pesos ###
  alpha_u = 0.02*alpha_u
```

```
alpha_losses = 0.01*alpha_losses
alpha_soc =100.0*alpha_soc
alpha_temp = 650.0*alpha_temp
alpha_stress = 0.002*alpha_stress
alpha_socSC = 1.0*alpha_socSC


#### Tamanho do horizonte de tempo - N ###
m.time=[0, 0.5, 1]


#### Variaveis Manipulaveis - Correntes de balanceamento (Output) ###
Ib1 = m.MV(value=0, name='ib1')
Ib1.STATUS = 1 #Valor manipulavel
Ib1.FSTATUS = 1 # Feedback
Ib1.DMAX=5  # Valor maximo permitido mudar
Ib1.DCOST=alpha_u # Custo da variavel mudar de valor
# Restricoes maximas e minimas
Ib1.UPPER=5
Ib1.LOWER=-5

Ib2 = m.MV(value=0, name='ib2')
Ib2.STATUS = 1
Ib2.FSTATUS = 1
Ib2.DMAX=5
Ib2.DCOST=alpha_u
Ib2.UPPER=5
Ib2.LOWER=-5

Ib3 = m.MV(value=0, name='ib3')
Ib3.STATUS = 1
Ib3.FSTATUS = 1
Ib3.DMAX=5
Ib3.DCOST=alpha_u
Ib3.UPPER=5
Ib3.LOWER=-5

#### Capacidade dos modulos ###
Q1 = m.Const(value=8.1, name='q1')
Q2 = m.Const(value=8.1, name='q2')
Q3 = m.Const(value=10.8, name='q3')
Qsc = m.Const(value=0.756, name='qsc')

#### Parametros termicos dos modulos de baterias ###
TemperaturaAmbiente =  m.Const(value=Ta, name='ta')    #Temperatura ambiente
R1_bat = m.Const(value=0.017,name= 'r1_temp')
C1h = m.Const(value=125.0,name= 'c1h')
R1cov = m.Const(value=13.7,name= 'r1cov')
R2_bat = m.Const(value=0.017,name='r2_temp') #0.012
```

```
C2h = m.Const(value=125.0, name='c2h')
R2cov = m.Const(value=13.7, name='r2cov')
R3_bat = m.Const(value=0.0129, name='r3_temp')
C3h = m.Const(value=161.0, name='c3h')
R3cov = m.Const(value=10.3,name= 'r3cov')

#### Resistencia dos conversores ###
R=m.Const(0.3)
#### Resistencia dos SC ###
Rsc=m.Const(0.0022)

#### Variaveis de gestao de potencia
pl = m.Var(value=0) #Potencia perdida nos conversores
p_b = m.Var(value=0) #Potencia de balanceamento
p_bat = m.Var(value=0) #Potencia nos modulos

#### Corrente de carga ###
Iout=m.Param(value=0) # Valor medido e atualizado mas constante durante o
  horizonte

#### Corrente nos SC - Valor apenas calculado ###
Isc=m.Var(value=0)

#### Tensao nos modulo - Valor medido e atualizado mas constante durante o
  horizonte
Vb1 = m.Const(3.5, 'vb1')
Vb2 = m.Const(3.5, 'vb2')
Vb3 = m.Const(3.5, 'vb3')


#### Corrente nos modulos. Pode ser adicionado feedback ###
Istress1 = m.SV(value=0, name='istress1')
Istress1.FSTATUS = 0

Istress2 = m.SV(value=0, name='istress2')
Istress2.FSTATUS = 0

Istress3 = m.SV(value=0, name='istress3')
Istress3.FSTATUS = 0

#### Potencia dos SC ###
Psc = m.SV(value=0, name='psc')
Psc.FSTATUS = 0

#### Estado de carga dos modulos - com o valor maximo (ub) e minimo e (lb) ###
SOC1c = m.SV(value=SOC[0], name='soc1c', ub=100, lb=0)
SOC1c.FSTATUS = 1

SOC2c = m.SV(value=SOC[1], name='soc2c', ub=100, lb=0)
```

```
131 SOC2c.FSTATUS = 1
132
133 SOC3c = m.SV(value=SOC[2], name='soc3c', ub=100, lb=0)
134 SOC3c.FSTATUS = 1
135
136 #### Estado de carga dos SC
137 SOCSCc = m.SV(value=SOC_VSC[0], name='socscc', ub=100, lb=0)
138 # Feedback - Valor calculado e mais importante
139 # O valor medido e impreciso devido a quedas de tensao e a nao medicao de Isc
140 SOCSCc.FSTATUS = 0.05 # 5%
141
142 #### Temperatura dos Modulos ###
143 T1c = m.SV(value=Temp[0], name='t1')
144 # Leitura de temperatura e muito ruidosa. e necessario um valor baixo de feedback
145 T1c.FSTATUS = 0.01 # 1%
146
147 T2c = m.SV(value=Temp[1], name='t2')
148 T2c.FSTATUS = 0.01
149
150 T3c = m.SV(value=Temp[2], name='t3')
151 T3c.FSTATUS = 0.01
152
153
154 #### Variaveis para o calculo da trajetoria ###
155 # Valores de inicializacao nao sao utilizados
156 # sao substituidos no arranque
157 SP_SOC1 = m.Var(value=SOC[0])
158 SP_SOC2 = m.Var(value=SOC[1])
159 SP_SOC3 = m.Var(value=SOC[2])
160 SP_SOCsc = m.Var(value=SOC_VSC[0])
161 SP_TEMP1 = m.Var(value=Temp[0])
162 SP_TEMP2 = m.Var(value=Temp[1])
163 SP_TEMP3 = m.Var(value=Temp[2])
164 SOC_avg=m.Var(value=SOC[2])
165 Temp_avg = m.Var(value=Temp[2])
166
167 ########################################
168 #### Modelacao ##########################
169 ########################################
170
171 # Calculo do SoC das baterias
172 m.Equation(SOC1c.dt() == -100.0*(Ib1+Iout)/(Q1*3600.0))
173 m.Equation(SOC2c.dt() == -100.0*(Ib2+Iout)/(Q2*3600.0))
174 m.Equation(SOC3c.dt() == -100.0*(Ib3+Iout)/(Q3*3600.0))
175 m.Equation(SOCSCc.dt() == 100.0*(Isc)/(Qsc*3600.0))
176
177 # Calculo da temperatura
178 m.Equation(T1c.dt() == ((Ib1+Iout) * (Ib1+Iout) * R1_bat-(T1c-TemperaturaAmbiente
    )/R1cov)/C1h)
```

```
179 m.Equation(T2c.dt() == ((Ib2+Iout) * (Ib2+Iout) * R2_bat-(T2c-TemperaturaAmbiente
      )/R2cov)/C2h)
180 m.Equation(T3c.dt() == ((Ib3+Iout) * (Ib3+Iout) * R3_bat-(T3c-TemperaturaAmbiente
      )/R3cov)/C3h)
181
182 # Transito de potencias
183 m.Equation(p_b == Ib1*Vb1+Ib2*Vb2+Ib3*Vb3) # Potencia das baterias para o
      baleanceamento
184 m.Equation(pl == Ib1*Ib1*R+Ib2*Ib2*R+Ib3*Ib3*R) # Potencia perdida nos
      conversores
185 m.Equation(p_bat == (Ib1+Iout) * (Ib1+Iout) * R1_bat + (Ib2+Iout) * (Ib2+Iout) *
      R2_bat + (Ib3+Iout) * (Ib3+Iout) * R3_bat)
186 m.Equation(Psc == Isc*(2.0*SOCSCc/100.0+3)) # Potencia nos SC com base na tensao
      obtida a partir do SoC
187 m.Equation(Psc == p_b-pl) # Potencia nos SC e a potencia de balanceamento menos
      as perdas nos conversores
188
189 # Esforco nas celulas
190 m.Equation(Istress1 == Iout+Ib1)
191 m.Equation(Istress2 == Iout+Ib2)
192 m.Equation(Istress3 == Iout+Ib3)
193
194 # Calculo das trajetorias
195 m.Equation(SOC_avg==(SOC1c+SOC2c+SOC3c)/3)
196 m.Equation(Temp_avg==(T1c+T2c+T3c)/3)
197 m.Equation(SP_SOC1.dt() == 0.012*(SOC_avg-SP_SOC1))
198 m.Equation(SP_SOC2.dt() == 0.012*(SOC_avg-SP_SOC2))
199 m.Equation(SP_SOC3.dt() == 0.012*(SOC_avg-SP_SOC3))
200 m.Equation(SP_SOCsc.dt() == 0.2*(SOC_avg-SP_SOCsc))
201 m.Equation(SP_TEMP1.dt() == 0.012*(Temp_avg-SP_TEMP1))
202 m.Equation(SP_TEMP2.dt() == 0.012*(Temp_avg-SP_TEMP2))
203 m.Equation(SP_TEMP3.dt() == 0.012*(Temp_avg-SP_TEMP3))
204
205 # Balanceamento
206 m.Obj((SOC1c-SP_SOC1)*(SOC1c-SP_SOC1)*alpha_soc)
207 m.Obj((SOC2c-SP_SOC2)*(SOC2c-SP_SOC2)*alpha_soc)
208 m.Obj((SOC3c-SP_SOC3)*(SOC3c-SP_SOC3)*alpha_soc)
209 m.Obj((T1c-SP_TEMP1)*(T1c-SP_TEMP1)*alpha_temp)
210 m.Obj((T2c-SP_TEMP2)*(T2c-SP_TEMP2)*alpha_temp)
211 m.Obj((T3c-SP_TEMP3)*(T3c-SP_TEMP3)*alpha_temp)
212
213 # Mantem estado de carga dos SC
214 m.Obj((SOCSCc-SP_SOCsc)*(SOCSCc-SP_SOCsc)*alpha_socSC)
215
216 # Minimizacao do esforco
217 m.Obj(Istress1*Istress1*alpha_stress)
218 m.Obj(Istress2*Istress2*alpha_stress)
219 m.Obj(Istress3*Istress3*alpha_stress)
220
```

```
221 # Minimizacao das perdas
222 m.Obj((pl + Isc*Isc*Rsc + p_bat)*(pl + Isc*Isc*Rsc + p_bat)*alpha_losses)
223
224
225 ### Propriedades do controlador ##
226 m.options.IMODE = 6           # Model Predictive Control
227 # (Nao usado) m.options.CV_TYPE = 2 # Objetivo das variaveis controlaveis e
      quadratico
228 m.options.NODES = 1           # Collocation points in the span of each time
      segment
229 m.options.SOLVER=3            # IPOPT
230 m.options.COLDSTART =1
231
232 ############################
233 #### Fim do init gekko ####
234 ############################
235
236 ########################################
237 #### Main control#######################
238 ########################################
239 @staticmethod
240 def run(SOC, SOC_SC,Temp, iout, Q, V,i):
241   x=np.array([0.0,0.0,0.0])
242
243   ######################################
244   #### GEKKO ###########################
245   ######################################
246
247   ### Atualizacao dos valores do MPC ####
248   pyControl.Ib1.MEAS = i[0]   # Valor medido
249   pyControl.Ib2.MEAS = i[1]
250   pyControl.Ib3.MEAS = i[2]
251
252   pyControl.SOC1c.MEAS = SOC[0]   # Valor medido
253   # Trajetoria comeca no valor atual
254   pyControl.SP_SOC1.value = SOC[0]
255   pyControl.SOC2c.MEAS = SOC[1]
256   pyControl.SP_SOC2.value = SOC[1]
257   pyControl.SOC3c.MEAS = SOC[2]
258   pyControl.SP_SOC3.value = SOC[2]
259   pyControl.SOCSCc.MEAS = SOC_SC[0]
260   pyControl.SP_SOCsc.value = SOC_SC[0]
261
262   pyControl.T1c.MEAS = Temp[0]
263   pyControl.SP_TEMP1.value = Temp[0]
264   pyControl.T2c.MEAS = Temp[1]
265   pyControl.SP_TEMP2.value = Temp[1]
266   pyControl.T3c.MEAS = Temp[2]
267   pyControl.SP_TEMP3.value = Temp[2]
```

```
268
269   # Atualizacao dos valor constantes necessarios
270   pyControl.Iout.value = iout[0]
271   pyControl.Vb1.value = V[0]
272   pyControl.Vb2.value = V[1]
273   pyControl.Vb3.value = V[2]
274
275   ### Calcula solucao ##############################
276   try:
277     pyControl.m.solve(disp=pyControl.debug, WEB=0)
278
279   ### Atualiza a corrente caso tenha conseguido chegar a uma solucao
280     if pyControl.m.options.APPSTATUS == 1:
281       x[0]=pyControl.Ib1.VALUE[1]
282       x[1]=pyControl.Ib2.VALUE[1]
283       x[2]=pyControl.Ib3.VALUE[1]
284
285       if(pyControl.debug):
286         with open(pyControl.m.path+'//results.json') as f:
287           results = json.load(f)
288         ### Imprime os vetores com os valores calculados para o horizonte de
    tempo
289         print("soc_sc ",pyControl.SOCSCc.value)
290         print("soc_sc setpoint ",pyControl.SP_SOCsc.value)
291         print("soc_1 ",pyControl.SOC1c.value)
292         print("soc_1 setpoint ",pyControl.SP_SOC1.value)
293     ### Se nao encontrar solucao
294     else:
295       print("Nenhuma solucao encontrada")
296       x=[0.0,0.0,0.0]
297   ### Se existir uma falha
298   except Exception as e:
299     print(str(e)) # Imprime o erro
300     x=[0.0,0.0,0.0]
301
302
303   return x
```

Listing D.1: Controlador MPC implementado em Python usando a ferramenta GEKKO