



Rendimento de Ciclos de Carga e Descarga em Baterias de Armazenamento de Energia Elétrica Aplicadas em Veículos

VASCO ROCHA ALVES

outubro de 2025

Rendimento de Ciclos de Carga e Descarga em Baterias de Armazenamento de Energia Elétrica Aplicadas em Veículos

Vasco Rocha Alves

**Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Automóvel**

Orientador: Eng. Paulo Jorge Lourenço Ferreira da Silva

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade.

Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Portanto, o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 22 de outubro de 2025

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Em especial, manifesto a minha profunda gratidão ao CRAS – Centro de Robótica e Sistemas Autónomos, pela colaboração prestada, em particular ao Eng. Eduardo Soares e ao Eng. Carlos Almeida, por me terem permitido desenvolver a parte prática do estudo nas instalações do CRAS, com a cedência de equipamentos e baterias, e ao Denys Sytnyk, pelo apoio indispensável na utilização dos carregadores, fundamental nos primeiros ensaios.

Redijo igualmente um agradecimento especial ao Laboratório de Circuitos e Sinais Elétricos do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE) do ISEP, que, através do Eng. Mário Alves, me cedeu um multímetro com termopar para o acompanhamento térmico dos ensaios.

Agradeço também ao meu orientador, Eng. Paulo Silva, pelo acompanhamento e orientações ao longo deste trabalho, e ao meu colega e amigo João, pelos momentos de descontração após as sessões de orientação, que permitiram clarificar ideias e discutir diferentes pontos de vista.

Por fim, mas não menos importante, um agradecimento especial à minha Lua, pela paciência, ajuda e apoio incondicional ao longo destes últimos meses.

A todos os que, de forma direta ou indireta, contribuíram para este trabalho, deixo o meu sincero obrigado.

Resumo

A eletrificação do setor automóvel torna as baterias recarregáveis centrais para o desempenho e fiabilidade de veículos elétricos e híbridos, mas existe escassez de dados sobre o rendimento energético real em uso quotidiano. Este trabalho avalia experimentalmente diferentes tecnologias de baterias através de ensaios controlados, esclarecendo o seu desempenho real.

Inicialmente, é apresentado o estado da arte dos veículos eletrificados, das tecnologias existentes e dos métodos de medição de eficiência em baterias, com destaque para as inovações e limitações atuais no setor automóvel. Foram ensaiadas seis baterias de naturezas distintas – íões de lítio (*NCA*, *NCM+* (estado semi-sólido), *LFP*), polímero de lítio (*Li – Po*) e chumbo-ácido do tipo *AGM* – de modo a representar o panorama atual da aplicação de baterias em veículos. Os ensaios realizados envolveram ciclos de carga-descarga sob várias condições de operação, medindo corrente, tensão e temperatura. A metodologia baseou-se na utilização combinada de um carregador inteligente com uma fonte e multímetro, permitindo registar, com elevada precisão, os perfis de tensão e corrente ao longo dos ciclos, com posterior cálculo da potência e energia acumulada, compreendendo medições experimentais detalhadas, definição das condições de teste e análise comparativa dos resultados obtidos com dados de referência. Neste sentido foram definidos dois casos de estudo: (#1) determinação do rendimento energético em diferentes condições de carga e descarga; e (#2) avaliação da capacidade real comparada com os valores nominais indicados.

Nos resultados do Caso de Estudo #1, a eficiência das baterias revelou forte dependência da tecnologia e da faixa de SoC. As baterias de *MMC+* mostraram maior eficiência na faixa parcial 20–80 %, enquanto as restantes baterias *Li – ion* foram mais eficientes em ciclo completo devido à menor corrente aplicada (0.2 C). A bateria de *Li – Po* destacou-se com eficiência significativamente maior em ciclo completo (95.2 % vs. 81.6 %); a bateria *AGM* manteve valores próximos do de referência mesmo em fim de vida. Globalmente, as eficiências situaram-se entre 88 % e 91.4 %.

No Caso de Estudo #2, com apenas um ensaio realizado por C-rate, os resultados mostraram energia e capacidade geralmente ligeiramente superiores a 100 % das especificações. Ensaios adicionais seriam necessários para maior rigor e minimização de erros.

Os resultados reforçam que nenhum sistema atinge 100 % de eficiência, sendo as perdas internas um dos aspetos críticos, sobretudo a elevadas taxas de corrente e em ciclos completos. Salienta-se ainda que a eficiência global calculada considera apenas perdas internas da célula, não incluindo BMS, conversores e cablagem, pelo que a eficiência útil real tende a ser inferior aos valores medidos.

Conclui-se que a caracterização experimental é essencial para validar informações técnicas e apoiar o desenvolvimento de sistemas de mobilidade elétrica mais fiáveis. O estudo contribui também para a definição de metodologias de ensaio aplicáveis em contextos académicos e industriais, identificando limitações e sugerindo futuras linhas de investigação.

Palavras-chave: Baterias, Carga e Descarga, Rendimento e Eficiência Energética

Abstract

The electrification of the automotive sector makes rechargeable batteries central to the performance and reliability of electric and hybrid vehicles, but there is a lack of data on actual energy efficiency in everyday use. This work experimentally evaluates different battery technologies through controlled tests, clarifying their actual performance.

First, the state of the art of electrified vehicles, existing technologies, and battery efficiency measurement methods are presented, highlighting current innovations and limitations in the automotive sector. Six different types of batteries were tested – lithium-ion (*NCA*, *NCM+* (semi-solid state), *LFP*), lithium polymer (*Li – Po*) and *AGM* lead-acid – in order to represent the current landscape of battery application in vehicles. The tests involved charge-discharge cycles under various operating conditions, measuring current, voltage and temperature. The methodology was based on the combined use of a smart charger with a power supply and multimeter, allowing the voltage and current profiles to be recorded with high precision throughout the cycles, with subsequent calculation of the power and accumulated energy, comprising detailed experimental measurements, definition of test conditions and comparative analysis of the results obtained with reference data. In this regard, two case studies were defined: (#1) determination of energy yield under different charging and discharging conditions; and (#2) evaluation of actual capacity compared to the nominal values indicated.

In the results of Case Study #1, battery efficiency showed a strong dependence on technology and SoC range. *NMC+* batteries showed greater efficiency in the partial range 20–80 %, while the remaining *Li – ion* batteries were more efficient in a full cycle due to the lower applied current (0.2C). The *Li – Po* battery stood out with significantly higher efficiency in full cycle (95.2 % vs. 81.6 %); the *AGM* battery maintained values close to the reference even at the end of its life. Overall, efficiencies ranged between 88 % and 91.4 %.

In Case Study #2, with only one test performed by C-rate, the results showed energy and capacity generally slightly higher than 100 % of the specifications. Additional tests would be necessary for greater accuracy and minimisation of errors.

The results reinforce that no system achieves 100 % efficiency, with internal losses being one of the critical aspects, especially at high current rates and in full cycles. It should also be noted that the calculated overall efficiency only considers internal cell losses, not including BMS, converters, and cabling, so the actual useful efficiency tends to be lower than the measured values.

It is concluded that experimental characterisation is essential to validate technical information and support the development of more reliable electric mobility systems. The study also contributes to the definition of test methodologies applicable in academic and industrial contexts, identifying limitations and suggesting future lines of research.

Keywords: Batteries, Charging and Discharging, Energy Efficiency

Conteúdo

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xxi
Lista de Abreviações	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Introdução e Motivação	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Organização e Estrutura da Dissertação	4
2 Veículos Eletrificados - Diferentes Tipologias	7
2.1 Veículo Elétrico a Bateria - BEV	7
2.2 Veículo Híbrido - HV	9
2.2.1 Veículo Híbrido Elétrico - HEV	11
Híbrido em Série (S-HEV)	11
Híbrido em Paralelo (P-HEV)	13
Híbrido Série-Paralelo (SP-HEV)	14
2.2.2 Veículo Elétrico Híbrido Plug-In - PHEV	16
2.2.3 Veículo Elétrico com Extensor de Autonomia - EV-REx	17
2.3 Veículo Elétrico a Pilha de Combustível - FCEV	19
2.3.1 Funcionamento da pilha de combustível	20
2.4 Comparação das Diferentes Tipologias	23
3 Baterias	25
3.1 Conceitos de Eletricidade	25
3.1.1 Ligações em Série e Paralelo	27
3.2 Tipos de Baterias	27
3.2.1 Baterias de Tração	28
3.2.2 Baterias de Alimentação	28
3.3 Propriedades das Baterias utilizadas nos VEs	29
3.4 Parâmetros de Controlo em Baterias	33
3.5 Tecnologias Existentes	36
3.5.1 Bateria de Chumbo-Ácido - $Pb - PbO_2$	37
Baterias de Gel	39
Baterias <i>AGM (Absorbed Glass Mat)</i>	39
3.5.2 Bateria de Iões de Lítio - $Li - ion$	40
As Variantes Mais Comuns das Baterias de Iões de Lítio por Alteração do Ânodo/Cátodo	41
Bateria de Polímero de Iões de Lítio ou Lítio-Polímero - $Li - Po$	43
Formatos das Baterias de Iões de Lítio	44

3.5.3	Bateria de Níquel-Cádmio - $Ni - Cd$	46
3.5.4	Bateria de Hidreto Metálico de Níquel - $Ni - MH$	47
3.5.5	Bateria de Zinco-Bromo - $Zn - Br_2$	48
3.5.6	Bateria de Cloreto de Níquel e Sódio (<i>ZEBRA</i>) - $Na - NiCl$	49
3.5.7	Bateria de Sódio-Enxofre - $Na - S$	49
3.5.8	Bateria de Estado Sólido	50
3.5.9	Comparação das diferentes tecnologias	50
3.5.10	Exemplos de aplicação das diferentes tecnologias	52
3.6	Carregamento	55
4	Rendimento de Baterias	57
4.1	Os Efeitos da Temperatura no Rendimento de Baterias	57
4.1.1	Gestão Térmica em Baterias Automóveis	57
4.1.2	<i>Thermal Runaway</i>	59
	Causas do <i>Thermal Runaway</i>	60
4.2	Carga/Descarga de Baterias	62
4.2.1	Estratégias e Métodos de Controlo de Carga	62
4.2.2	Estratégias e Métodos de Controlo de Descarga	64
4.2.3	Balanceamento de Carga	66
4.2.4	Importância da Gestão dos Ciclos de Carga/Descarga em Baterias	68
4.3	Eficiência de Baterias	68
4.3.1	Eficiência Coulombica em Baterias	69
4.3.2	Eficiência Energética do Ciclo de Carga e Descarga de Baterias	70
	2011 - O Caso de Estudo de Roterdão	71
	2023 - Avaliação da Eficiência Energética de Baterias em contexto IoT	72
5	Medição do Rendimento da Carga e Descarga de Baterias	75
5.1	CASO DE ESTUDO #1 - Rendimento de Carga e Descarga de Baterias	76
5.1.1	Método de Medição de Energia Utilizado	76
5.1.2	Equipamentos e Material Utilizado	76
5.1.3	Baterias Submetidas a Ensaio	78
	Bateria 1 - Sanyo NCR18650GA	79
	Bateria 2 - SHP320-35	80
	Bateria 3 - HC85120GC1-20	81
	Bateria 4 - EXIDE ETZ14-BS	81
	Bateria 5 - Fordeary FDE-Li-24-36-NL	82
	Bateria 6 - Turnigy Bolt 1800	83
5.1.4	Procedimento do Estudo e Ensaio Realizados	84
	Parâmetro <i>End Current</i> - o que é e a sua importância	86
	Acompanhamento de Temperatura	87
5.2	CASO DE ESTUDO #2 - Avaliação da Capacidade Real de Baterias	89
5.2.1	Procedimento do Estudo e Ensaio Realizados	89
5.2.2	Comparação e Avaliação de Resultados	90
6	Análise dos Resultados Experimentais Obtidos e Eficiência Energética das Baterias Testadas	93
6.1	Resultados Obtidos	93
6.1.1	CASO DE ESTUDO #1	95

6.1.2	CASO DE ESTUDO #2	98
6.2	Tratamento e Análise dos Resultados	99
6.2.1	CASO DE ESTUDO #1	99
6.2.2	CASO DE ESTUDO #2	104
7	Notas Finais	105
7.1	Conclusões	105
7.2	Limitações	107
7.3	Trabalhos Futuros	107
	Bibliografia	109
A	Capacidade das Baterias de Diferentes Veículos Elétricos	115
B	Teste de SoC à bateria de chumbo-ácido	117
C	Curvas Típicas de Tensão vs. SoC das Tecnologias de Bateria Ensaçadas	119
D	Ensaços Realizados - Bateria 1	123
D.1	20-80 % SoC	124
D.2	0-100 % SoC	133
E	Ensaços Realizados - Bateria 2	135
E.1	20-80 % SoC	136
E.2	0-100 % SoC	142
F	Ensaços Realizados - Bateria 3	143
F.1	20-80 % SoC	144
F.2	0-100 % SoC	153
G	Ensaços Realizados - Bateria 4	155
G.1	20-80 % SoC	156
H	Ensaços Realizados - Bateria 5	163
H.1	20-80 % SoC	164
H.2	0-100 % SoC	170
I	Ensaços Realizados - Bateria 6	171
I.1	20-80 % SoC	172
I.2	0-100 % SoC	181

Lista de Figuras

1.1	Veículos Eletrificados - Exemplos por Tipologia	2
1.2	Cronologia do desenvolvimento dos veículos eletrificados.	3
1.3	Novos Registos de Automóveis por Fonte de Energia na EU+EFTA+UK (ACEA 2019, 2024)	3
2.1	<i>Powertrain</i> típico de um Veículo Elétrico	8
2.2	<i>Powertrain</i> típico de um Veículo Híbrido	12
2.3	Sistema e-Power da Nissan - híbrido em série.	12
2.4	Funcionamento de um híbrido em série.	13
2.5	Funcionamento de um híbrido em paralelo.	13
2.6	Componentes do sistema THS II.	14
2.7	Plataforma TNGA utilizada no Toyota C-HR Hybrid (Gen 1)	15
2.8	Funcionamento de um híbrido série-paralelo.	15
2.9	<i>Powertrain</i> típico de um Veículo Híbrido Plug-In	16
2.10	SoC típico da bateria num EV-REx.	18
2.11	<i>Powertrain</i> do BMW i3 REx.	18
2.12	<i>Powertrain</i> típico de um Veículo Elétrico com Extensor de Autonomia	19
2.13	Princípio de funcionamento de uma PEMFC.	21
2.14	Exemplo de esquema de ligação entre o módulo da pilha de combustível da Toyota com equipamento externo.	22
2.15	Localização dos componentes no Toyota Mirai de 1 ^a geração.	22
2.16	<i>Powertrain</i> típico de um Veículo <i>Fuel Cell</i>	23
2.17	Comparação dos <i>Powertrains</i> das diferentes Tipologias dos Veículos Eletri- ficados mais comuns	23
3.1	Configuração de duas baterias em paralelo e em série.	28
3.2	Evolução da capacidade das baterias desde 1980 até 2020.	30
3.3	Bateria Bosch 12V em corte.	37
3.4	Representação esquemática de uma bateria de chumbo-ácido em carga e descarga, evidenciando as transformações químicas dos elétrodos.	38
3.5	Célula de Bateria 18650 (também conhecidas por 1865).	44
3.6	Formatos das Baterias <i>Li – ion</i> - (A) Cilíndrica, (B) Prismática e (C) em Bolsa.	46
3.7	Etapas de montagem de um pack de baterias típico de um VE, a partir da célula até à integração no veículo.	46
3.8	Baterias de Chumbo num Emplihador Toyota.	53
3.9	Etapas e componentes de estações de carregamento de veículos elétricos.	55
3.10	Fichas para carregamento de viaturas eletrificadas em função do tipo de corrente utilizada.	56
4.1	Arrefecimento de uma bateria por fluxo de fluido (ar forçado/líquido).	58
4.2	Três fases do processo de <i>thermal runaway</i>	60

4.3	Valores típicos da taxa de auto-aquecimento efetuados em ARC durante o ensaio de resistência térmica de uma bateria <i>Li – ion</i>	61
4.4	Fases de carregamento e valores típicos de um inversor <i>Sunny Island</i> numa bateria <i>AGM</i>	64
4.5	Perda de energia e de capacidade em células não balanceadas.	67
4.6	Eficiência de Baterias por Tecnologia (Hasan, Tom e Yuce 2023)	72
5.1	Montagem Experimental, com o (A) carregador (equivalente), (B) fonte, (C) multímetro e (D) bateria.	78
5.2	Posicionamento do termopar para controlo da temperatura	86
6.1	Curva obtida num ensaio de descarga da Bateria 6	94
6.2	Resultados Obtidos nos ensaios do CASO DE ESTUDO #2 - Energia e Capacidade registada em cada ensaio em comparação com os valores de referência especificados pelos fabricantes.	99
6.3	Eficiência - BAT 1.	99
6.4	Eficiência - BAT 2.	100
6.5	Eficiência - BAT 3.	100
6.6	Eficiência - BAT 4.	101
6.7	Eficiência - BAT 5.	101
6.8	Eficiência - BAT 6.	102
6.9	Eficiência Global das Baterias Testadas por faixa de SoC	103
6.10	Energia e Capacidade Real das Baterias Testadas	104
C.1	Curvas de Descarga da célula NCR18650GA (<i>NCA</i>).	119
C.2	Curvas de Carga Típica de uma Bateria <i>NCM</i>	120
C.3	Curva de Carga Experimental de uma Bateria <i>LFP</i>	121
C.4	Curva de Carga Típica de uma Bateria <i>Li – Po</i>	121
D.1	BAT1_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1	124
D.2	BAT1_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2	124
D.3	BAT1_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3	125
D.4	BAT1_#1_20-80_CHARGE_1.0C_1	125
D.5	BAT1_#1_20-80_CHARGE_1.0C_2	126
D.6	BAT1_#1_20-80_CHARGE_1.0C_3	126
D.7	BAT1_#1_20-80_CHARGE_2.0C_1	127
D.8	BAT1_#1_20-80_CHARGE_2.0C_2	127
D.9	BAT1_#1_20-80_CHARGE_2.0C_3	128
D.10	BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1	128
D.11	BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2	129
D.12	BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3	129
D.13	BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_1	130
D.14	BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_2	130
D.15	BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3	131
D.16	BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_1	131
D.17	BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_2	132
D.18	BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_3	132
D.19	BAT1_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1	133
D.20	BAT1_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1	133

E.1	BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1	136
E.2	BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2	136
E.3	BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3	137
E.4	BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.75C_1	137
E.5	BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.75C_2	138
E.6	BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.75C_3	138
E.7	BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1	139
E.8	BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2	139
E.9	BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3	140
E.10	BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_1	140
E.11	BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_2	141
E.12	BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_3	141
E.13	BAT2_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1	142
E.14	BAT2_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1	142
F.1	BAT3_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1	144
F.2	BAT3_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2	144
F.3	BAT3_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3	145
F.4	BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.0C_1	145
F.5	BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.0C_2	146
F.6	BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.0C_3	146
F.7	BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.5C_1	147
F.8	BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.5C_2	147
F.9	BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.5C_3	148
F.10	BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1	148
F.11	BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2	149
F.12	BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3	149
F.13	BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_1	150
F.14	BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_2	150
F.15	BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3	151
F.16	BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.5C_1	151
F.17	BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.5C_2	152
F.18	BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.5C_3	152
F.19	BAT3_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1	153
F.20	BAT3_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1	153
G.1	BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.2C_1	156
G.2	BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.2C_2	156
G.3	BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.2C_3	157
G.4	BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1	157
G.5	BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2	158
G.6	BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3	158
G.7	BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.2C_1	159
G.8	BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.2C_2	159
G.9	BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.2C_3	160
G.10	BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1	160
G.11	BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2	161
G.12	BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3	161
H.1	BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1	164

H.2	BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2	164
H.3	BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3	165
H.4	BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.75C_1	165
H.5	BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.75C_2	166
H.6	BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.75C_3	166
H.7	BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1	167
H.8	BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2	167
H.9	BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3	168
H.10	BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_1	168
H.11	BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_2	169
H.12	BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_3	169
H.13	BAT5_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1	170
H.14	BAT5_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1	170
I.1	BAT6_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1	172
I.2	BAT6_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2	172
I.3	BAT6_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3	173
I.4	BAT6_#1_20-80_CHARGE_1.0C_1	173
I.5	BAT6_#1_20-80_CHARGE_1.0C_2	174
I.6	BAT6_#1_20-80_CHARGE_1.0C_3	174
I.7	BAT6_#1_20-80_CHARGE_2.0C_1	175
I.8	BAT6_#1_20-80_CHARGE_2.0C_2	175
I.9	BAT6_#1_20-80_CHARGE_2.0C_3	176
I.10	BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1	176
I.11	BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2	177
I.12	BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3	177
I.13	BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_1	178
I.14	BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_2	178
I.15	BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3	179
I.16	BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_1	179
I.17	BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_2	180
I.18	BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_3	180
I.19	BAT6_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1	181
I.20	BAT6_#1_0-100_CHARGE_0.5C_1	181
I.21	BAT6_#1_0-100_CHARGE_0.5C_2	182
I.22	BAT6_#1_0-100_CHARGE_0.5C_3	182
I.23	BAT6_#1_0-100_CHARGE_1.0C_1	183
I.24	BAT6_#1_0-100_CHARGE_1.0C_2	183
I.25	BAT6_#1_0-100_CHARGE_1.0C_3	184
I.26	BAT6_#1_0-100_CHARGE_2.0C_1	184
I.27	BAT6_#1_0-100_CHARGE_2.0C_2	185
I.28	BAT6_#1_0-100_CHARGE_2.0C_3	185
I.29	BAT6_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1	186
I.30	BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_0.5C_1	186
I.31	BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_0.5C_2	187
I.32	BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_0.5C_3	187
I.33	BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_1.0C_1	188
I.34	BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_1.0C_2	188
I.35	BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_1.0C_3	189

I.36	BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_2.0C_1	189
I.37	BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_2.0C_2	190
I.38	BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_2.0C_3	190

Lista de Tabelas

2.1	Quadro-resumo com a comparação dos níveis de hibridização	11
2.2	Quadro de resumo, com a comparação entre BEV, HEV e PHEV	16
2.3	Quadro resumo das principais tipologias de veículos eletrificados.	24
3.1	Exemplos de correspondência para diferentes valores de C-rate	36
3.2	Exemplos de cálculo com C-rate	36
3.3	Caracterização das Variantes das Baterias Li-ion por Alteração do Ânodo/- Cátodo	43
3.4	Ligações dos packs de bateria de diferentes modelos eletrificados (Warner 2015)	45
3.5	Quadro-resumo comparativo dos diferentes formatos de células de íons de lítio (Warner 2015).	47
3.7	Resistência Interna e Temperatura de Operação de diferentes tecnologias de baterias.	51
3.8	Densidade Energética, Energia e Potência Específica de diferentes tecnolo- gias de baterias.	52
3.9	Ciclos de Vida Útil e Auto-Descarga Mensal de diferentes tecnologias de baterias.	52
3.10	Exemplos de veículos para diferentes tipos de baterias para tração, incluindo automóveis, motocicletas, veículos pesados e utilitários.	54
4.1	Métodos de controlo de carga e descarga de baterias.	66
4.2	Eficiência da Unidade Motriz de Veículos Elétricos por Componente	70
4.3	Sistemas de Bateria do estudo eMobility-Lab da Universidade de Roterdão (Van Sterkenburg et al. 2011)	72
5.1	Características principais do iCharger DX12 (iCharger 2023).	77
5.2	Quadro-resumo das baterias ensaiadas.	79
5.3	Principais Características da Bateria 1.	80
5.4	Principais Características da Bateria 2.	81
5.5	Principais Características da Bateria 3.	82
5.6	Principais Características da Bateria 4.	82
5.7	Principais Características da Bateria 5.	83
5.8	Principais Características da Bateria 6.	83
5.9	Lista de ensaios realizados - CASO DE ESTUDO #1	84
5.10	Valores de <i>End Current</i> para cada bateria ensaiada	86
5.11	Lista de ensaios realizados - CASO DE ESTUDO #2	90
6.1	Resultados Obtidos nos ensaios do CASO DE ESTUDO #1 - Energia re- gistrada em cada ensaio e valor médio (MED) do rácio	96
6.2	Variação de Temperatura (ΔT) registada nos ensaios do CASO DE ES- TUDO #1	97

6.3	Resultados Obtidos nos ensaios do CASO DE ESTUDO #2 - Energia registada em cada ensaio para cálculo de rendimento	98
A.1	Capacidade das baterias de diferentes veículos elétricos.	115
B.1	Teste de SoC à bateria de chumbo-ácido, com valores típicos de tensão.	117
C.1	Tensão OCV Típica em função do SoC em Baterias AGM 12V.	120

Lista de Abreviações

μHV	Micro Hybrid Vehicle
AC	Alternating Current (Corrente Alternada)
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (Associação Europeia de Fabricantes de Automóveis)
AVAS	Acoustic Vehicle Alert System
BAT	Bateria
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Battery Management System
BTMS	Battery Thermal Management System
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
DoD	Depth of Discharge
EC	Eficiência Coulombica
EV-REx	Electric Vehicle with Range Extensor
FC	Fuel Cell
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FH	Fator de Hibridização
FHV	Full Hybrid Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HV	Hybrid Vehicle
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MCI	Motor de Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
MG	Motor-Gerador
MHV	Mild Hybrid Vehicle
PCM	Phase-Change Materials
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
P-HEV	Parallel Hybrid Electric Vehicle
RC	Retenção de Capacidade
redox	redução-oxidação
REx	Range Extensor
SEI	Solid Electrolyte Interface
S-HEV	Series Hybrid Electric Vehicle
SI	Sistema Internacional de Unidades
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
SP-HEV	Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle
THS	Toyota Hybrid Sinergy
VE	Veículo Eletrificado
ZEBRA	Zero Emission Battery Research Activities

Química:

AGM	A bsorbent G lass M at
e^-	Eletrão
H_2	H idrogénio
LCO	Cobalto de Lítio (LiCoO₂)
LFP	Fosfato de Ferro e Lítio (LiFePO₄)
Li^+	ião de L ítio
Li – ion	Iões de L ítio (bateria)
Li – Po	L ítio- P olímero
LMO	Manganês de Lítio (LiMn₂O₄)
LTO	Titanato de Lítio (Li₄Ti₅O₁₂)
Na – NiCl	Sódio-Cloreto de Níquel
NCA	N íquel- C obalto- A lumínio (LiNiCoAlO₂)
Ni – Cd	N íquel- C ádmio
Ni – MH	Hidreto Metálico de Níquel (N íquel- M etal- H idreto)
NMC	N íquel- M anganês- C obalto (LiNiMnCo₂)
Pb – PbO₂	Chumbo-Óxido de Chumbo
Zn – Br₂	Z inco- B romo

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução e Motivação

Os veículos eletrificados tem sido uma realidade cada vez mais presente nas nossas estradas. São cada vez mais os consumidores (particulares e empresas) que, por toda a Europa, escolhem os veículos elétricos para locomoção própria. Na verdade, os veículos eletrificados englobam muito mais que apenas os veículos elétricos (ver Figura 1.1).

Na verdade, tal como refere Martins e Brito 2011, os veículos eletrificados não são uma novidade aos dias de hoje: os veículos eletrificados surgem nas décadas de 1830 a 1840 (ver Figura 1.2) como uma alternativa mais fiável, mais limpa e menos poluente aos veículos à data e na «passagem do século XIX para o XX, a maioria dos veículos automóveis eram elétricos». No entanto, acabam por cair em desuso por quase um século em parte pelo aumento da fiabilidade e diminuição dos custos dos motores a combustão (Reddy et al. 2024).

Quer por exigência legislativa e regulamentar no que a emissões diz respeito, ou mesmo devido a tendências de mercado, os veículos eletrificados surgem em força no século XXI, onde os principais fabricantes tem vindo a investir em novas tecnologias ligadas à mobilidade livre de emissões (pelo menos na fase de utilização do produto). Veja-se a Figura 1.3, na qual estão representadas as vendas dos veículos eletrificados de passageiros, de acordo com as publicações periódicas da ACEA (Associação dos Construtores Europeus de Automóveis¹), em 2017 e 2023, na EU+EFTA+UK²: o aumento das vendas de viaturas eletrificadas é notório.

Daqui advém a grande motivação para a realização deste trabalho: com o aumento da procura por este tipo de soluções, aumenta também a informação difundida de forma incorreta. Infelizmente, na realidade atual dos automóveis elétricos (entenda-se veículos eletrificados) encontram-se, nomeadamente em vários artigos, em revistas da especialidade, em comentários no meio automobilístico informações erróneas, quer por manipulação do marketing das vendas, quer por falta de conhecimento e ignorância do consumidor, que pode ser facilmente induzido em erro. Os tempos de carregamento referidos pelos fabricantes em carregadores rápidos (carregamentos super-rápidos a potências elevadas) são cada vez mais reduzidos, mas não incluem o fator rendimento de carga. Os picos de corrente gerados por consumos instantâneos elevados, quer em arranques, quer em manutenção de velocidades elevadas

¹do francês *Association des Constructeurs Européens d'Automobiles*, a ACEA é a principal organização que representa a indústria automóvel europeia.

²A designação EU+EFTA+UK engloba os 27 Estados-Membros da União Europeia (EU), os 4 países da Associação Europeia de Comércio Livre (EFTA - Islândia, Liechtenstein, Noruega e Suíça) e o Reino Unido (UK).

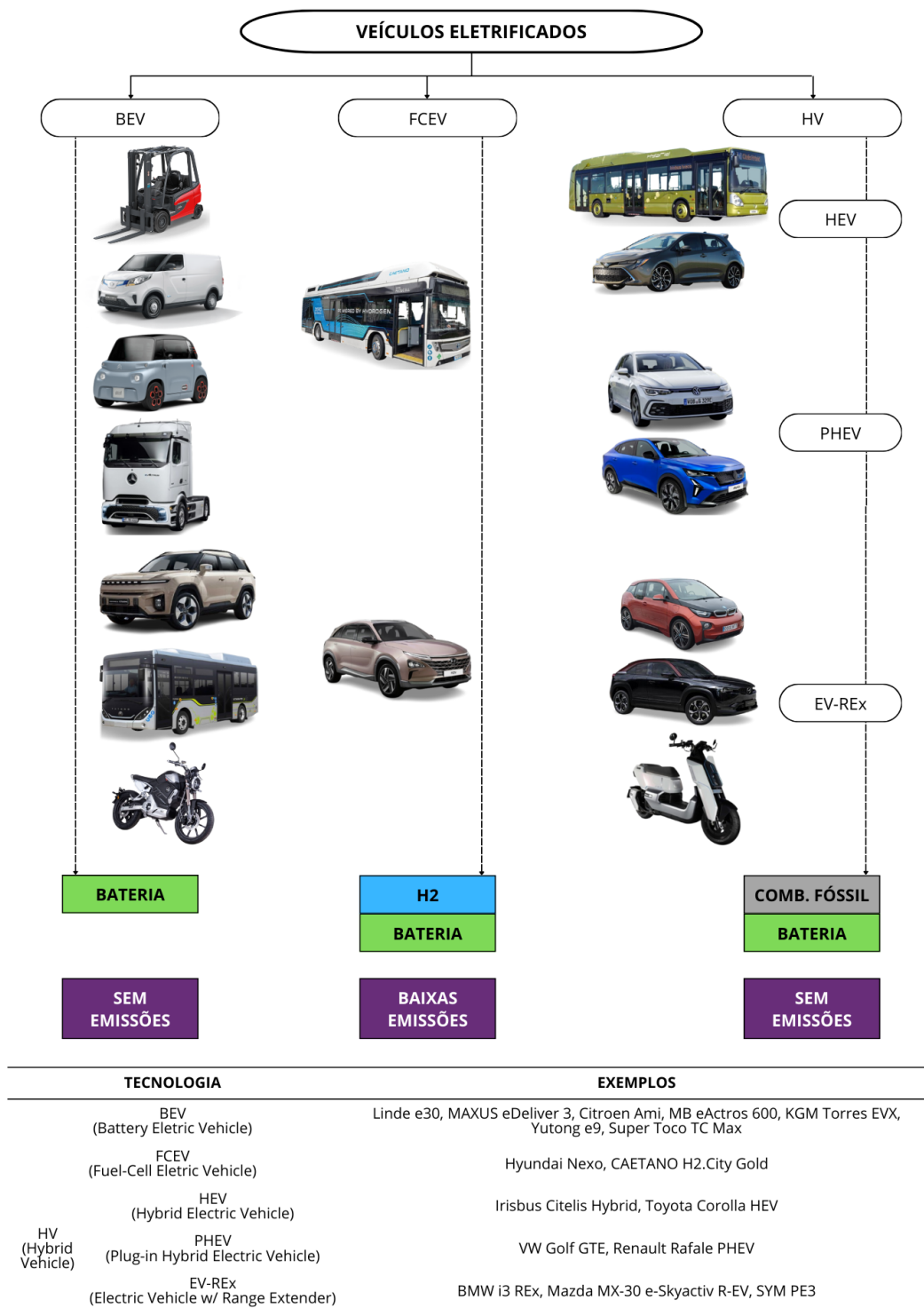


Figura 1.1: Veículos Eletrificados - Exemplos por Tipologia

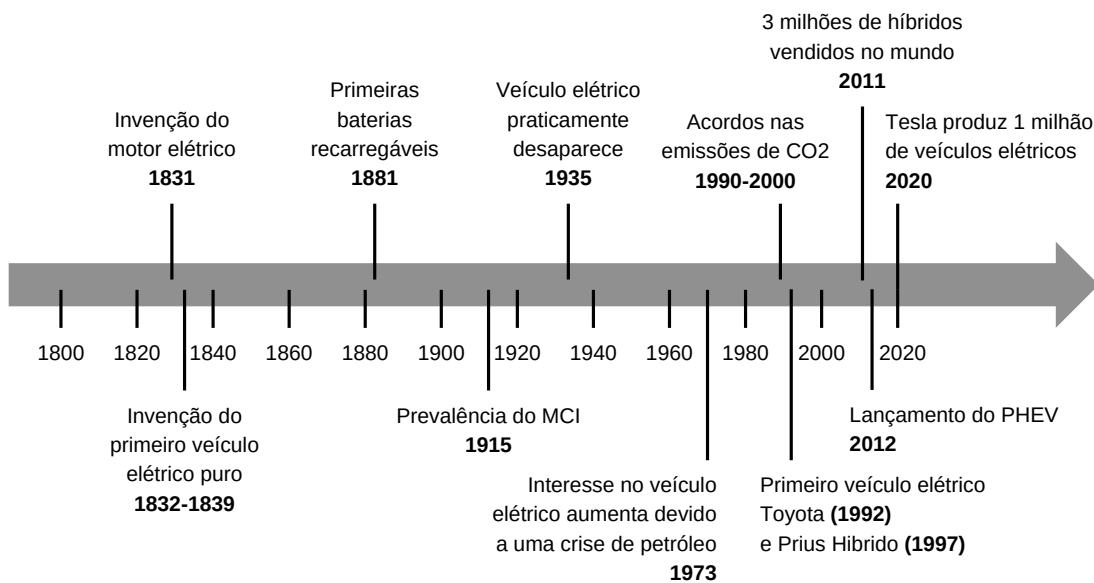


Figura 1.2: Cronologia do desenvolvimento dos veículos eletrificados.
Adaptado de: Reddy et al. 2024

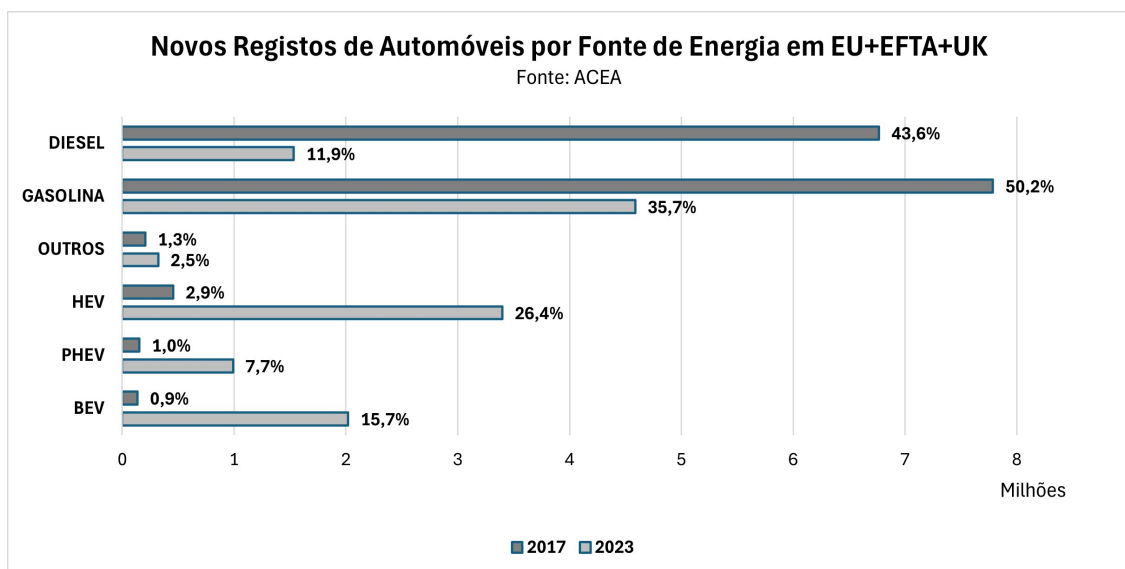


Figura 1.3: Novos Registos de Automóveis por Fonte de Energia na EU+EFTA+UK (ACEA 2019, 2024)

tendem a diminuir o rendimento de descarga. Pretende-se então, com a realização deste trabalho, avaliar o rendimento de carga e descarga de diferentes tecnologias de baterias e em diferentes condições, através de medições experimentais.

1.2 Objetivos

Com a realização da Dissertação subordinada a este tema pretende-se contribuir para o esclarecimento de informações sobre o desempenho real das baterias utilizadas no armazenamento de energia em veículos. O principal objetivo desta dissertação é avaliar o rendimento energético de diferentes tecnologias de baterias aplicadas a veículos eletrificados, através da realização de ensaios experimentais de carga e descarga. O cumprimento deste objetivo é conseguido com a execução das seguintes tarefas:

- Caracterizar o estado da arte sobre veículos eletrificados, sistemas de armazenamento de energia e métodos de medição de eficiência em baterias;
- Selecionar e descrever um conjunto representativo de baterias de diferentes tecnologias, associadas a aplicações reais;
- Definir a metodologia experimental para ensaios de carga e descarga, estabelecendo condições de operação (faixas de SoC, limites de tensão, C-rates) e critérios de comparação entre tecnologias;
- Determinar experimentalmente o rendimento de ciclos de carga e descarga em cada bateria, analisando a influência da taxa de corrente, do intervalo de operação e da capacidade nominal;
- Comparar a capacidade real obtida nos ensaios com os valores fornecidos pelos fabricantes, identificando discrepâncias e possíveis causas;
- Analisar criticamente os resultados, relacionando-os com valores de referência disponíveis na literatura;
- Desenvolver conclusões com base teórica e identificar limitações do estudo, incluindo pontos de melhoria e investigação futura.

Pretende-se, com este trabalho, contribuir para uma compreensão mais rigorosa do desempenho real das baterias, colmatando a escassez de informação fiável disponível para utilizadores e investigadores. Desta forma, a dissertação visa não apenas quantificar o desempenho energético de diferentes baterias, mas também fornecer um contributo para a validação experimental e para o desenvolvimento de metodologias comparativas aplicáveis em contextos académicos e até industriais.

1.3 Organização e Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos, para além dos elementos pré-textuais (resumo, lista de figuras, tabelas e abreviaturas), sendo estes:

- **Capítulo 1 – Introdução:** apresenta o enquadramento do tema, a motivação que sustenta a investigação, os objetivos definidos e a estrutura do documento;

- **Capítulo 2 – Veículos Eletrificados - Diferentes Tipologias:** descreve as principais categorias de veículos com propulsão elétrica, incluindo várias tipologias híbridas e elétricas, com análise das suas vantagens, limitações e perspetivas de evolução;
- **Capítulo 3 – Baterias:** aborda as diferentes tecnologias de baterias aplicáveis à indústria automóvel, detalhando as suas características de funcionamento, parâmetros de desempenho e limitações;
- **Capítulo 4 – Rendimento de Baterias:** apresenta os valores de rendimento de diferentes tecnologias de baterias disponíveis na literatura e os efeitos da temperatura no rendimento de baterias e os métodos de carga/descarga de baterias, incluindo estratégias de controlo e impacto sobre o desempenho e a durabilidade dos sistemas de armazenamento;
- **Capítulo 5 – Medição do Rendimento da Carga e Descarga de Baterias:** descreve a metodologia experimental adotada, os equipamentos utilizados, as baterias selecionadas e os procedimentos aplicados nos casos de estudo desempenhados;
- **Capítulo 6 – Análise dos Resultados Experimentais Obtidos e Eficiência Energética das Baterias Testadas:** apresenta e discute os resultados dos ensaios realizados, comparando-os com referências da literatura e identificando padrões de desempenho;
- **Capítulo 7 – Notas Finais:** reúne as principais conclusões do trabalho, identifica limitações e sugere linhas de investigação futura.

Por fim, são incluídos anexos com material complementar, nomeadamente os registos gráficos detalhados dos ensaios experimentais.

Capítulo 2

Veículos Eletrificados - Diferentes Tipologias

Quando se refere o termo «veículo eletrificado» é feita a associação quase automática a veículo elétrico. Por observação da Figura 1.1 (do capítulo anterior), é perceptível o quão errado é fazer-se essa associação.

Por analogia, da mesma forma que existe uma variedade de tecnologias disponíveis para os veículos a combustão (equipados com um motor de combustão interna - MCI), os veículos eletrificados também acomodam diferentes tecnologias/necessidades. A maior característica de um automóvel elétrico é que pode ser ligado a uma tomada ou posto de carregamento para carregar através de uma fonte de energia externa. No entanto, tal não se aplica aos híbridos convencionais, cuja bateria é recarregada unicamente através da regeneração de energia durante a travagem e/ou pelo próprio motor de combustão, não sendo possível o carregamento externo. Essa possibilidade é exclusiva dos veículos elétricos e híbridos *plug-in*,

Assim sendo, neste ponto irão ser expostas as principais tipologias de veículos eletrificados existentes no mercado europeu.

2.1 Veículo Elétrico a Bateria - BEV

O veículo elétrico a bateria, ou simplesmente **veículo elétrico**, tem como principais componentes um (ou mais) motor(es) elétrico(s), um controlador e um sistema de armazenamento de energia (vulgarmente chamado de bateria) (Martins e Brito 2011), tal como esquematizado na Figura 2.1. Para a sua locomoção, o veículo faz uso da energia armazenada na(s) bateria(s), na forma química para alimentar o(s) motor(es) elétrico(s) e aplicar binário às rodas. Este tipo de veículos é também chamado de veículo 100% elétrico uma vez que não faz uso de outro tipo de combustível ou fonte de energia (Martins e Brito 2011; Reddy et al. 2024).

Nos veículos elétricos, a energia é «reabastecida» com a conexão do veículo à rede elétrica numa tomada ou posto de carregamento (ver Capítulo 3.6). Além disto, aquando da circulação com este tipo de veículo, o condutor pode também fazer uso do sistema de travagem regenerativa. Este sistema permite recuperar parte da energia cinética durante a desaceleração e/ou travagem, transformando-a em energia elétrica para recarregar a bateria, através da inversão do sentido da corrente no motor elétrico, passando a funcionar no modo gerador. O período de recarregamento da energia elétrica na bateria durante o processo de travagem regenerativa não aumenta a degradação da bateria, mesmo em situações de baixa temperatura da bateria (Islameka et al. 2023).

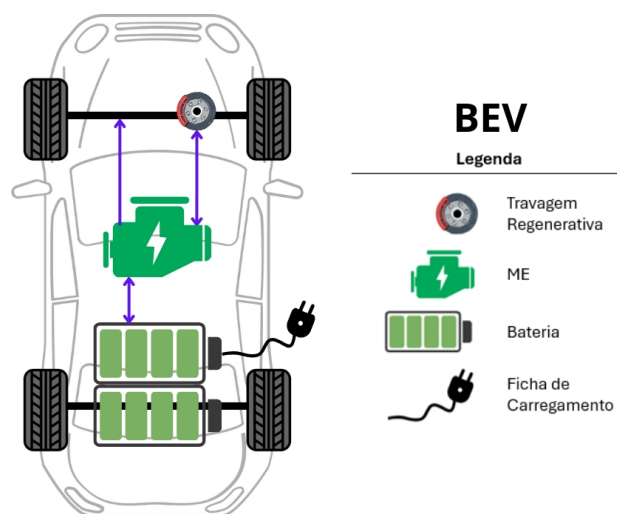


Figura 2.1: Powertrain típico de um Veículo Elétrico

Como não têm motor de combustão interna, os veículos elétricos não têm emissões de gases resultantes da queima de combustíveis, e por isso também não têm sistema de escape. Desta forma são considerados «veículos não poluentes», isto é, são isentos de emissões diretas durante a utilização: a poluição gerada pela utilização destes veículos «apenas» proveniente do fabrico do veículo, extração/transformação da sua matéria-prima e na obtenção da energia elétrica utilizada no carregamento das baterias. Além disso, o motor (de tração) do veículo elétrico, tal como qualquer máquina elétrica, é capaz de fornecer o binário máximo quase de forma imediata (instantânea) desde o arranque, ao passo que, no MCI, o binário depende da velocidade de rotação.

A nível de segurança e homologação, tal como é referido na literatura (Denton 2020), «os veículos elétricos têm de cumprir as mesmas normas de segurança que os veículos convencionais», por forma a obter a «homologação do tipo de veículo completo». No decorrer dos testes de colisão, é prestada especial atenção para garantir que as características de segurança específicas dos BEV são devidamente garantidas. Além disso, componentes individuais, como as baterias, são sujeitos a testes adicionais, nomeadamente de testes de impacto. Com isto, pretende-se evitar fenómenos como o *Thermal Runaway* (ver Capítulo 4.1.2).

Segundo Denton 2020, uma destas características é a utilização de ferramentas para desconectar a bateria de tração caso o veículo se envolva numa colisão: um interruptor de inércia nos sistemas mais antigos ou, mais recentemente, um sinal do sistema de *airbags*. Além disto, as próprias baterias são também concebidas com contactores internos¹ para garantir que, se o fornecimento de 12 V for interrompido por qualquer motivo, o fornecimento de energia de alta tensão para alimentar o(s) motor(es) elétrico(s) também seja desligado.

Também a nível de segurança, apesar destes veículos ainda gerem ruído de rolamento dos pneus, o nível de ruído é muito inferior ao de um veículo com motor de combustão interna (MCI), especialmente a baixa velocidade. Trata-se de uma questão especialmente sensível para pessoas com deficiência visual ou auditiva, que podem estar particularmente vulneráveis

¹Um contactor interno é um interruptor eletromecânico de alta potência integrado na bateria de tração que conecta ou desconecta a energia elétrica do sistema do veículo. É controlado eletronicamente para garantir segurança, desligando a bateria em caso de falhas, emergências ou manutenção, isolando o circuito de alta tensão.

(Denton 2020). Por este mesmo motivo, a Comissão Europeia torna obrigatório a utilização do sistema AVAS - *Acoustic Vehicle Alert System* - para mitigar os riscos associados ao baixo nível de ruído dos BEV (ou híbrido em modo 100 % elétrico), silenciosos em comparação com veículos de combustão interna. O AVAS é um sistema obrigatório em veículos elétricos (e híbridos) que emite sons artificiais de forma a alertar pedestres e outros utentes da estrada sobre a presença do veículo, especialmente em velocidades reduzidas: o sistema emite um som contínuo, de pelo menos 56 dB quando o veículo circula a uma velocidade inferior a 20 km/h (EU 2017; UNECE 2017).

2.2 Veículo Híbrido - HV

Tal como refere Vidyanandan 2018, a maior vantagem dos veículos convencionais a combustão é a longa autonomia de condução, devido à alta densidade energética dos combustíveis fósseis e da rapidez de reabastecimento. Apesar de veículos elétricos (BEV) possuírem muitas vantagens em relação aos veículos a combustão, como poluição nula na fase de utilização, alta eficiência e benefícios fiscais, a sua autonomia por carga (associada ao tempo de carregamento) é significativamente inferior devido ao menor conteúdo energético das baterias. Os veículos híbridos (HVs) permitem combinar os benefícios dos veículos a combustão com os benefícios dos veículos elétricos, superando as desvantagens de ambos.

O *powertrain* de um HV é tipicamente constituído por um MCI com um tanque de combustível, um motor elétrico e um conjunto de baterias (Martins e Brito 2011). Segundo Vidyanandan 2018, a propulsão elétrica oferece um desempenho de aceleração mais elevado a velocidades mais baixas, o que não pode ser alcançado em veículos a combustão devido às restrições mecânicas resultantes da sua construção. O fluxo de potência nos sistemas de propulsão é diferente: no MCI, é apenas unidirecional, do motor para as rodas, enquanto no sistema elétrico, o fluxo de energia pode ser bidirecional: bateria → motor/gerador → rodas e rodas → motor/gerador → bateria.

Segundo o mesmo autor, há quatro características geralmente comuns nos HVs, dependendo do tipo de veículo:

- (a) Circulação em marcha lenta (*Idle-off*): O motor é desligado quando o veículo está parado;
- (b) Travagem regenerativa: Reaproveitamento da energia cinética durante a travagem ou desaceleração para recarregar a bateria;
- (c) Assistência de potência (*Power assist*): Fornecimento de binário extra pelo motor elétrico durante a aceleração;
- (d) Condução exclusivamente elétrica: Capacidade de operar apenas com o motor elétrico em determinadas condições.

Para medir a proporção de potência elétrica em relação à potência total em um HEV, Vidyanandan 2018 enuncia um rácio denominado fator de hibridização (FH), dado por:

$$FH(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{ME})_i}{P_{MCI} + \sum_{i=1}^n (P_{ME})_i} \times 100, \quad (2.1)$$

onde:

- $FH(\%)$ é o fator de hibridização em percentagem,
- $(P_{ME})_i$ corresponde à potência (P) do motor elétrico (ME),
- n é o número de motores elétricos no veículo e, por último,
- P_{MCI} corresponde à potência (P) do motor de combustão interna (MCI).

Em função do fator de hibridização calculado, o autor sugere que os HEVs podem ser classificados em:

1. *Micro Hybrid* (μ HV):

- É o HV menos eletrificado: trata-se de um veículo convencional com MCI equipado com um motor de arranque super-dimensionado (3–5 kW a 12 V) que auxilia no arranque do motor e nos acessórios, como direção assistida e ar condicionado. Tipologia geralmente encontrada em veículos leves de utilização urbanas;
- Não pode impulsionar o veículo, mas é útil para operações de para-arranca (*idle-stop*² ou *start-stop*³);
- Durante o modo de marcha lenta de um μ HV, o motor de combustão é desligado e, durante a travagem regenerativa, o motor atua como um gerador para carregar a bateria. No entanto, a travagem regenerativa pode não ser uma funcionalidade padrão em todos os μ HVs;
- Os μ HVs apresentam um fator de hibridização típico de 5–10 %, proporcionando uma poupança de energia de cerca de 3–10 % em condução urbana.

2. *Mild Hybrid* (MHV):

- Assemelha-se a um micro híbrido, com um motor elétrico de 7–15 kW mas utiliza um sistema com tensão superior (36 V ou 48 V) e pode utilizar a travagem regenerativa para recarregar a pequena bateria;
- O motor elétrico não propulsionará o veículo sozinho, mas auxilia o arranque do MCI e oferece binário suplementar durante acelerações;
- O fator de hibridização dos *mild hybrid* é de cerca de 10–30 %; a poupança de energia em condução urbana é cerca de 20–30 %.

3. *Full Hybrid* (FHV):

- O *full hybrid* é capaz de operar exclusivamente no modo elétrico, e por isso chamado de híbrido completo. **Consideram-se portanto veículos híbridos elétricos (HEV).**
- Requer motores de maior capacidade (tipicamente com potências entre 30–50 kW num sistema de alta tensão, de 200 a 600 V);
- O fator de hibridização é superior a 30 % e a poupança de energia é a maior (cerca de 30–50 %).

²**Idle-Stop:** Neste sistema, o MCI desliga-se automaticamente quando o veículo circula a baixa velocidade, (p. ex. à chegada a semáforos) para economizar combustível, sendo reiniciado quando o condutor acelera. Nessas situações, o veículo é alimentado pela sua pequena bateria

³**Start-Stop:** Sistema em que o MCI se desliga quando o veículo está parado. O *start-stop* é otimizado para ciclos frequentes de paragem e arranque, reduzindo o consumo e as emissões em condução urbana e está também presente em veículos a combustão

Comparação dos níveis de hibridização:

Na Tabela 2.1 encontra-se um resumo das classificações vistas acima. Quando o MCI de um HV está em funcionamento, a unidade de controlo assegura que o motor opera sempre na sua zona de desempenho ideal, direcionando o excesso de energia para a bateria. Embora a travagem regenerativa seja uma funcionalidade comum em todos os HVs, os *micro* e *mild hybrid* não conseguem absorver toda a energia cinética do veículo durante uma paragem mais brusca. Isto deve-se ao facto destes terem um fator de hibridização mais baixo, devido geradores de menor dimensão, incapazes de converter toda a energia cinética disponível em eletricidade. Para recuperar o máximo da energia de travagem, o FH deve ser de cerca de 40 % ou superior. Este é o motivo pelo qual a poupança de energia aumenta com o nível crescente de hibridização.

Tabela 2.1: Quadro-resumo com a comparação dos níveis de hibridização

	Micro Hybrid	Mild Hybrid	Full Hybrid
Potência ME	3–5 kW	7–15 kW	>30 kW
HF	<10 %	10–30 %	>30 %
Poupança de Energia	5–10 %	20–30 %	30–50 %
	Start-stop	Start-stop	Start-stop
Funções	Trav. Regenerativa Assist. aos Acessórios	Trav. Regenerativa Assist. no Arranque	Trav. Regenerativa Circulação 100 % Elétrica

2.2.1 Veículo Híbrido Elétrico - HEV

Como exposto acima, os HEVs são populares pelas eficiências superiores em comparação aos veículos ditos convencionais.

De forma generalizada, pode dizer-se que o *powertrain* de um HEV é como representado na Figura 2.2. No entanto, dependendo de como os conversores de energia (isto é, o motor de combustão e o motor elétrico) são combinados para propulsionar o veículo, existem diferentes configurações para o *powertrain*:

- Híbrido em Série (S-HEV)
- Híbrido em Paralelo (P-HEV)
- Híbrido Série-Paralelo (SP-HEV)

Híbrido em Série (S-HEV)

O sistema de transmissão em série é a configuração híbrida mais simples, apesar de não tão utilizada (Martins e Brito 2011). Nesta construção, a força de tração do veículo é fornecida exclusivamente pelo motor elétrico, uma vez que o MCI não está ligado ao sistema de transmissão, funcionando como gerador de energia. O gerador alimenta o motor de tração (o ME) quando a solicitação de carga é elevada e carrega as baterias quando a exigência de potência é baixa. O motor também pode funcionar como gerador durante a travagem e o rolamento em inércia.

Os híbridos em série são os mais eficientes em ciclos de condução que requerem paragens e arranques frequentes, como veículos de entrega, autocarros urbanos e condução em cidade com paragens e arranques constantes. As desvantagens dos S-HEV incluem:

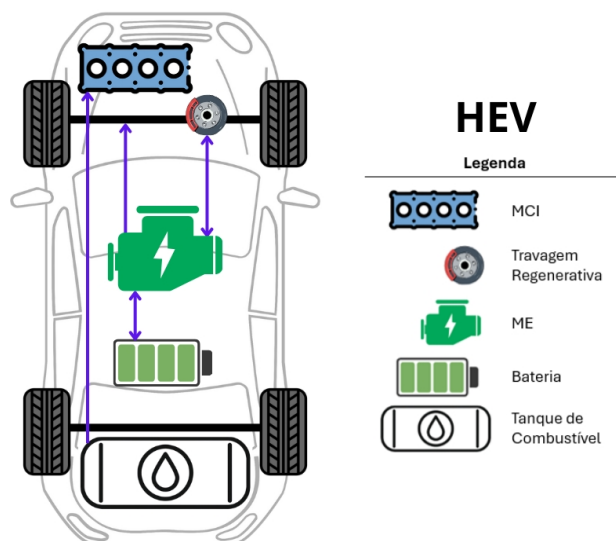


Figura 2.2: Powertrain típico de um Veículo Híbrido

- a necessidade de gerador e motor separados (o que implica maior custo e menor eficiência devido à presença de mais sistemas) (Szramowiat et al. 2018);
- a necessidade de um motor de tração de maior dimensão para atender às necessidades de potência máxima, como em subidas íngremes.

No entanto, como os híbridos em série utilizam uma máquina elétrica maior no sistema de propulsão, a sua capacidade de recuperação de energia é muito superior à de outros HEVs.

Um exemplo aos dias de hoje da utilização desta tecnologia é o sistema e-Power da Nissan (Figura 2.3), presente em modelos como o Qashqai e o X-Trail. Na figura 2.4 é possível observar esquematicamente o funcionamento do sistema.

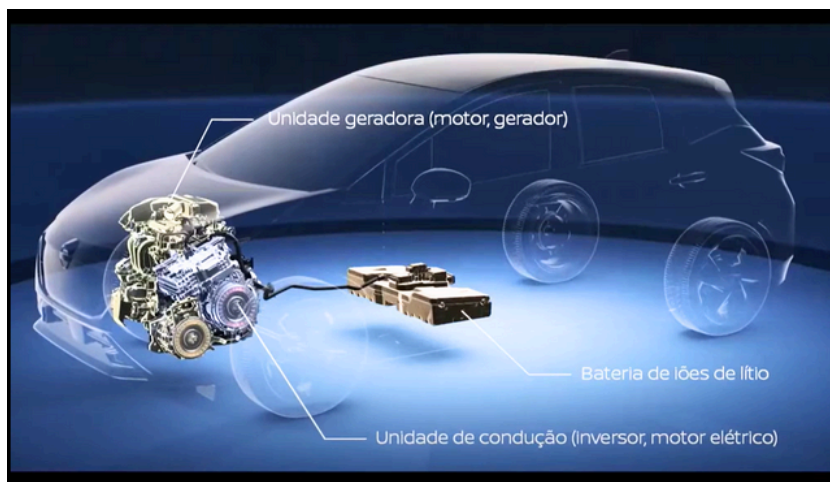


Figura 2.3: Sistema e-Power da Nissan - híbrido em série.
Retirado de: Nissan Portugal

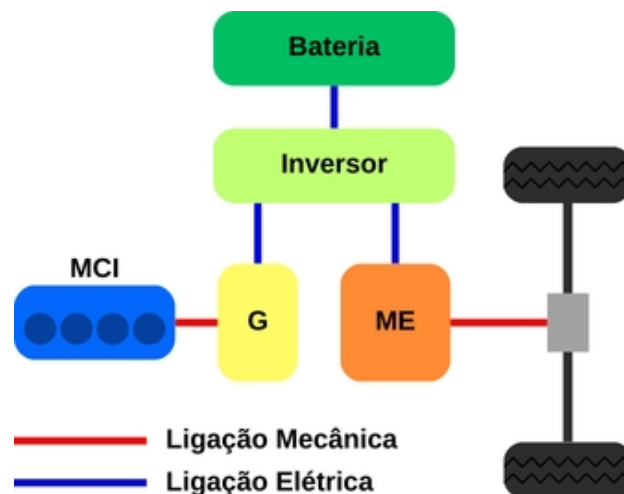


Figura 2.4: Funcionamento de um híbrido em série.
Legenda: G - Gerador

Híbrido em Paralelo (P-HEV)

Nos híbridos em paralelo, tanto o motor de combustão interna quanto o motor elétrico estão diretamente ligados ao sistema de transmissão. Estes podem tracionar o veículo em conjunto (em situações de exigência de maior potência) ou individualmente (quando a carga exigida é baixa). Na maioria dos P-HEV, o gerador e o motor elétrico são combinados numa única unidade (motor-gerador). No modo de transmissão paralelo, os binários fornecidos são somados. Quando apenas um dos dois sistemas está em operação, o outro é desligado por meio de uma embraiagem.

Os P-HEVs são relativamente mais compactos, pois utilizam um pacote de baterias menor do que outros híbridos e requerem um motor de tração menor. A desvantagem dos P-HEVs é a necessidade de sistemas mecânicos complexos e algoritmos de controle sofisticados.

Na figura 2.5 é possível observar esquematicamente o funcionamento do sistema.

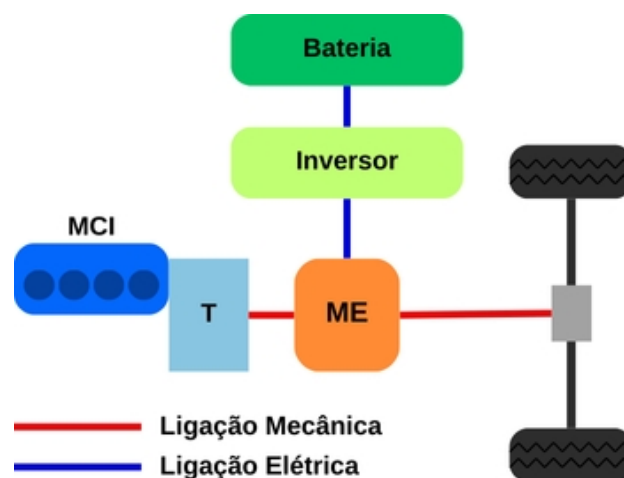


Figura 2.5: Funcionamento de um híbrido em paralelo.
Legenda: T - Transmissão

Híbrido Série-Paralelo (SP-HEV)

Os híbridos série-paralelo, também chamados de *power-split hybrid* (divisão de potência) combinam os benefícios das arquiteturas em série e em paralelo. Tal como refere Szramowiat et al. 2018, este sistema é composto por um MCI e duas unidades elétricas – motor-geradores (MG), que podem funcionar como motor elétrico ou gerador elétrico. Como completa o autor, também muito importante neste sistema é o conjunto planetário que faz ligação entre os motores (MCI, MG1, MG2). Este conjunto funciona como uma caixa de velocidades do tipo CVT (do inglês *Continuous Variable Transmission*), que substitui a caixa de velocidades convencional.

Os *power-split hybrid* utilizam motores de menor dimensão no seu sistema, mas este é capaz de fornecer uma potência de saída contínua superior aos híbridos em série ou em paralelo. Contudo, requerem um sistema de controlo altamente complexo.

Na Figura 2.6 está representado o sistema *Toyota Hybrid Sinergy* - THS (2ª geração). Pela sua construção, este sistema é altamente compacto, uma vez que todos são incorporados na unidade *transaxle*, que faz a ligação entre o MCI e as rodas. Trata-se de uma tecnologia amplamente difundida pela Toyota em várias gerações, equipando várias gerações de modelos globalmente vendidos como o Prius e o C-HR (Figura 2.7), que utilizam a plataforma TNGA⁴.

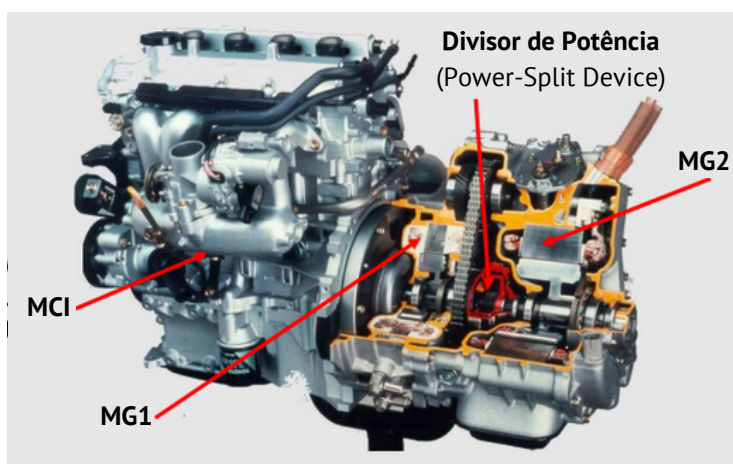


Figura 2.6: Componentes do sistema THS II.
Adaptado de: Apresentação Toyota Prius - Ordem dos Engenheiros

⁴A plataforma TNGA (*Toyota New Global Architecture*) foi desenvolvida para integrar de forma eficiente o sistema híbrido THS, de forma a otimizar o posicionamento dos seus componentes (como baterias e motores elétricos), melhorar a distribuição de peso e o centro de gravidade, e permitir maior eficiência energética, segurança e desempenho dinâmico nos veículos híbridos da marca.

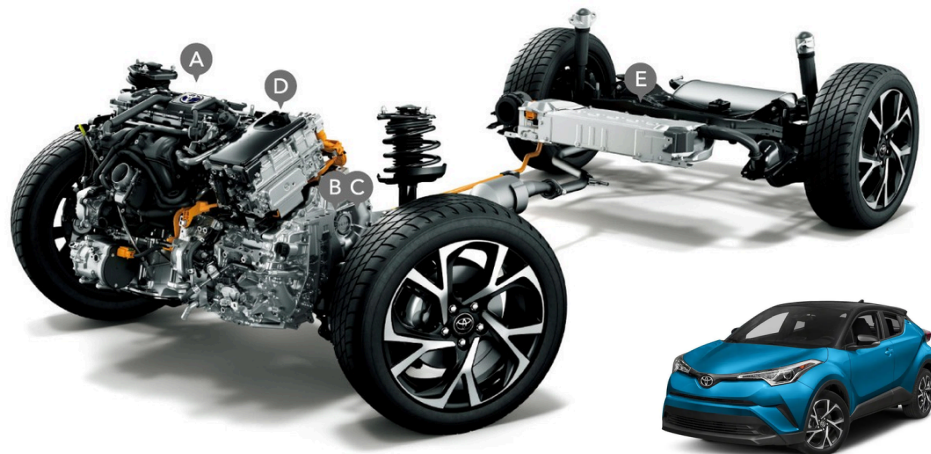


Figura 2.7: Plataforma TNGA utilizada no Toyota C-HR Hybrid (Gen 1)
Adaptado de: Saitama Toyopet co., Ltd. e Cars.com

Legenda	
(A)	Motor 2ZR-FXE a gasolina
(B)	Caixa <i>transaxle</i> híbrida (eCVT) com o MG1 no interior
(C)	Motor elétrico MG2
(D)	Unidade de controlo de potência (PCU)
(E)	Bateria do sistema híbrido

Na figura 2.8 é possível observar esquematicamente o funcionamento do sistema.

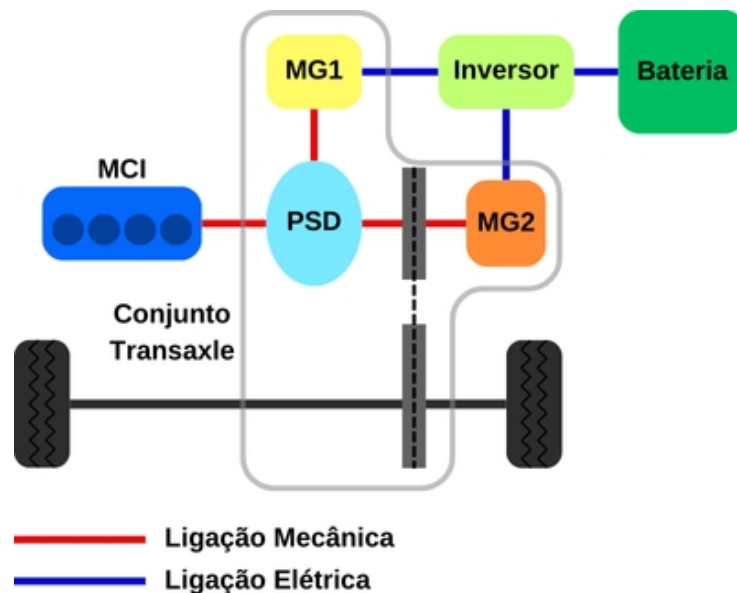


Figura 2.8: Funcionamento de um híbrido série-paralelo.
Legenda: PSD - Power Split Device

2.2.2 Veículo Elétrico Híbrido Plug-In - PHEV

Um veículo elétrico híbrido *plug-in*, ou PHEV pode-se dizer que é a fusão entre um veículo convencional a combustão e um veículo elétrico: combina um MCI com (pelo menos) um motor elétrico, sendo caracterizado pela possibilidade de recarregar sua bateria através de uma fonte externa de energia elétrica, como uma tomada ou estação de carregamento, tal como um BEV (ver o funcionamento do sistema - Figura 2.9). Este tipo de veículo oferece maior flexibilidade e eficiência em relação aos híbridos convencionais, permitindo o uso exclusivo do motor elétrico em trajetos mais curtos e a utilização do motor a combustão para percursos mais longos ou quando a bateria está descarregada (Denton 2020; Sanguesa et al. 2021).

Os PHEVs fazem também uso da travagem regenerativa para recarregar a bateria. Atualmente (dados de dezembro de 2024) já existem no mercado europeu modelos com autonomia exclusivamente elétrica superior a 100 km, como o Skoda Superb PHEV/VW Passat PHEV (até 135 km) e o Mercedes-Benz GLC 300e 4MATIC (até 130 km), tal como descrito por Caetano Retail 2024.

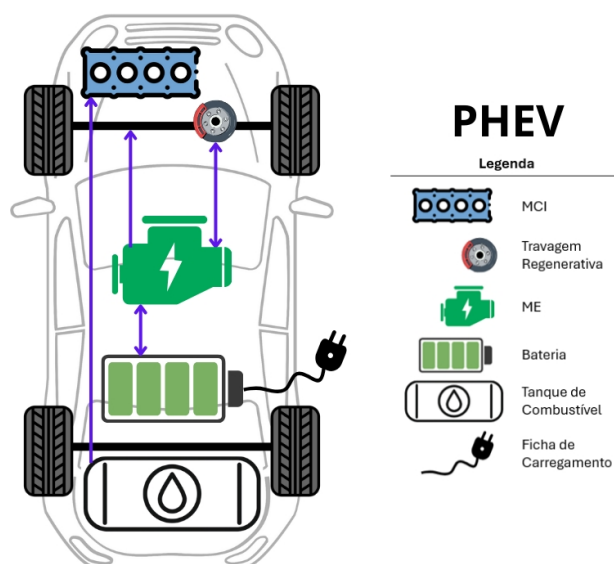


Figura 2.9: Powertrain típico de um Veículo Híbrido Plug-In

Comparação com outros veículos:

Os PHEVs representam uma solução intermediária entre os veículos totalmente elétricos (BEVs) e os híbridos convencionais (HEVs), sendo especialmente atrativos para condutores que desejam reduzir emissões sem depender exclusivamente da infraestrutura de carregamento elétrico. Na Tabela 2.2 encontra-se, de forma sintetizada, a comparação entre BEV, HEV e PHEV, relativamente ao seu *powertrain*.

Tabela 2.2: Quadro de resumo, com a comparação entre BEV, HEV e PHEV

Tipo	Motor Elétrico	MCI	Carga Externa	Autonomia Elétrica
BEV	Sim	Não	Sim	Alta
HEV	Sim	Sim	Não	Limitada
PHEV	Sim	Sim	Sim	Moderada

2.2.3 Veículo Elétrico com Extensor de Autonomia - EV-REx

Na sua essência, um veículo elétrico com extensor de autonomia (EV-REx) consiste num híbrido série com possibilidade de carregar a bateria numa fonte de energia externa. Tal como referem Martins e Brito 2011, neste tipo de veículos, o MCI «está ligado a um gerador elétrico que apenas produz eletricidade para alimentar os motores elétricos quando o estado das baterias é baixo, carregando as baterias com o excedente».

Alternativamente, como afirmam Dell, Moseley e Rand 2014, um EV-REx pode ser definido como «um veículo totalmente elétrico, com toda a tração fornecida por um motor elétrico, mas com um pequeno motor de combustão interna presente para gerar energia elétrica adicional». Nestes veículos, «quando a bateria é descarregada até um nível especificado, o [MCI] é ativado para operar um gerador que, por sua vez, fornece energia ao motor elétrico e/ou recarrega a bateria. Com este sistema, a limitação de autonomia inerente a um BEV pode ser superada».

Segundo os mesmos autores, para distâncias mais curtas, os EV-REx podem funcionar em modo totalmente elétrico e, assim, são tão limpos e eficientes em termos de energia como os BEVs (à semelhança dos PHEV mas ao contrário dos híbridos paralelos e outros híbridos em série com baterias menores e autonomia elétrica muito limitada). Por sua vez, para trajetos mais longos, os EV-REx utilizam o MCI para manter a bateria carregada, mas, em teoria, consomem significativamente menos combustível do que os veículos a combustão convencionais por duas razões:

- (a) O motor neste tipo de veículos é significativamente menor do que um MCI convencional uma vez que apenas precisa de atender às necessidades médias de potência, já que a potência de pico é fornecida pelo conjunto de baterias;
- (b) O motor de um EV-REx opera a uma velocidade de rotação constante e altamente eficiente, enquanto que o MCI de outros veículos funciona frequentemente a velocidades de rotação não constantes, tanto baixas como mais altas, ambas situações em que a eficiência é baixa.

Os diferentes modos de operação de um EV-REx são apresentados de forma gráfica na Figura 2.10, sendo analisadas três situações de circulação distintas:

- (a) O veículo inicia a marcha com o estado de carga (SoC) da bateria próximo de 100 %. Todo o movimento do veículo é realizado com recurso ao motor elétrico, que consome energia apenas da bateria. A bateria é parcialmente recarregada em cada evento de travagem regenerativa.
- (b) Quando a bateria se descarrega até um SoC pré-determinado (marcado na Figura com três níveis de gravidade crescente respetivamente nas linhas verde, laranja e vermelho) o veículo muda para o modo REx. Enquanto opera neste modo, o MCI é ativado conforme necessário para manter a bateria dentro do intervalo de SoC marcado pelas linhas tracejadas verde e vermelha.
- (c) Após a viagem, o SoC da bateria é restaurado para 100 % utilizando energia da rede elétrica (com ligação necessária a um carregador).

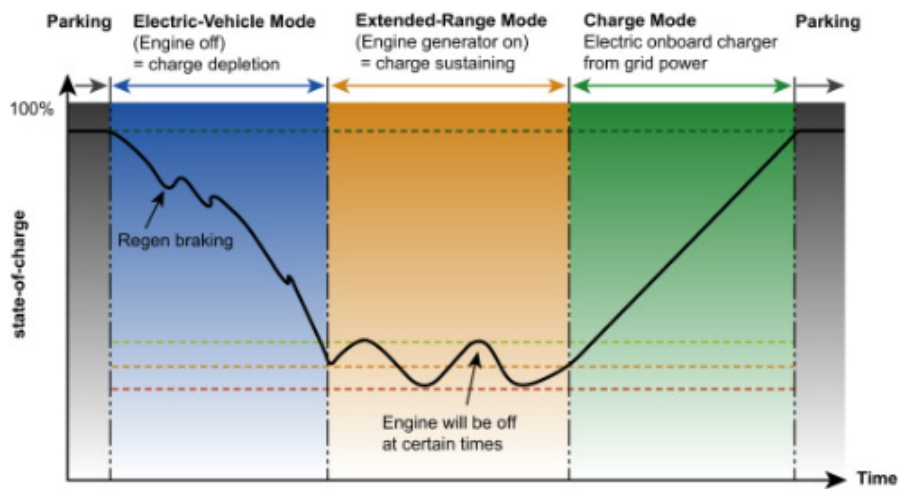


Figura 2.10: SoC típico da bateria num EV-REx.
Retirado de Dell, Moseley e Rand 2014.

Um dos modelos onde foi aplicada esta tecnologia foi o BMW i3 Rex. Este modelo, derivado do exclusivamente elétrico BMW i3, possui um pequeno motor a gasolina de 2 cilindros (com 647 cm^3) para acionar um alternador para fazer a recarga da bateria (ver Figura 2.11) (BMW de México 2024).

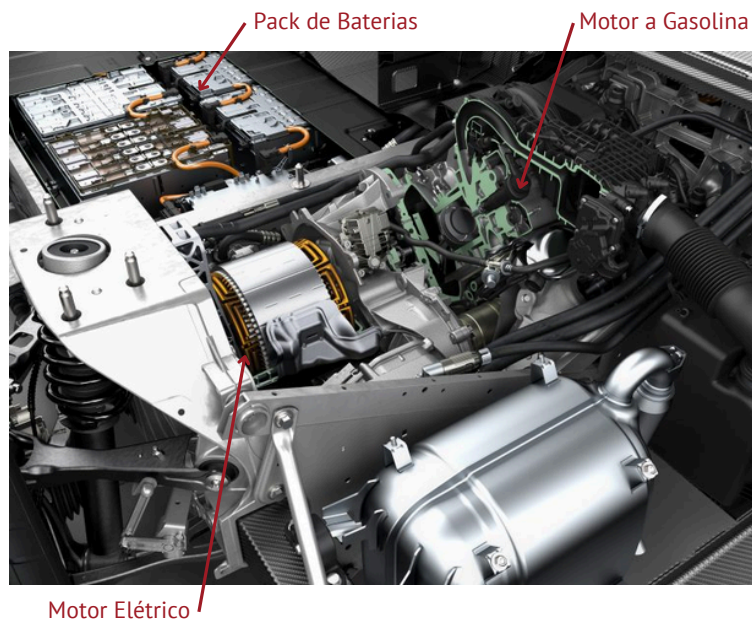


Figura 2.11: *Powertrain* do BMW i3 REx.
Adaptado de: arstechica.com/bmw-i3-review

Na figura 2.12 é possível observar esquematicamente o funcionamento do sistema.

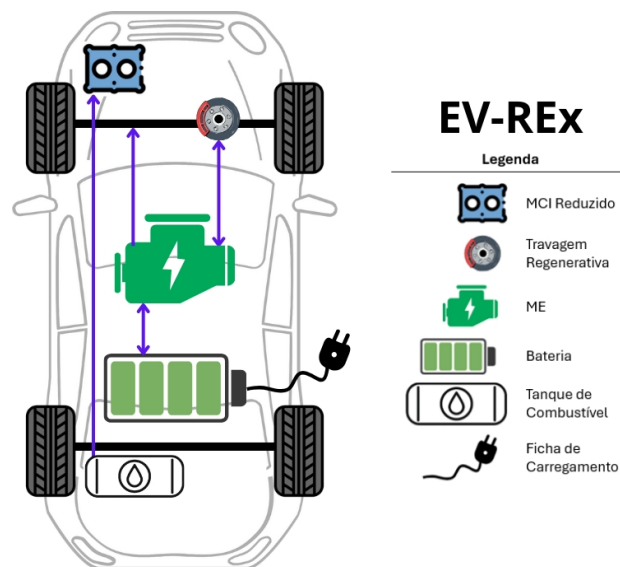


Figura 2.12: *Powertrain* típico de um Veículo Elétrico com Extensor de Autonomia

2.3 Veículo Elétrico a Pilha de Combustível - FCEV

Os veículos elétricos a pilha de combustível (do inglês *Fuel Cell Electric Vehicle* - FCEV) representam uma alternativa promissora aos veículos movidos por combustíveis fósseis e aos veículos eletrificados tradicionais (BEVs e HVs). Utilizando hidrogênio como combustível principal, o FCEV converte energia química em elétrica por meio de uma pilha de combustível, também chamada de *Fuel Cell Stack*, liberando apenas vapor de água como subproduto, tornando-os uma solução de mobilidade sustentável e livre de emissões poluentes (Vengatesan, Jayakumar e Sadasivuni 2024; Vidyanandan 2018).

Tal como apresentado por Vidyanandan 2018, os FCEVs destacam-se por oferecer:

- **Autonomia e Reabastecimento Rápido:** devido às capacidades de armazenamento de hidrogênio elevadas que os caracterizam, os FCEVs oferecem autônias comparáveis às dos veículos a combustão interna e reabastecimento em poucos minutos;
- **Baixo impacto ambiental,** emitindo apenas vapor de água, pelo que não existe contribuição direta para a poluição do ar.

No entanto, Sadeq 2024 refere alguns desafios significativos que esta tecnologia enfrenta, tais como:

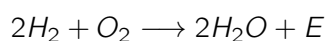
- **Custo Inicial e Infraestrutura:** O alto custo de produção dos stacks e a infraestrutura limitada de abastecimento de hidrogênio dificultam a adoção em massa;
- **Dependência de Hidrogênio Verde⁵:** Para maximizar os benefícios ambientais desta tecnologia, é crucial que o hidrogênio seja produzido a partir de fontes renováveis, o que atualmente representa uma pequena fração da produção global.

⁵O hidrogênio é classificado em três categorias principais: **cinzento**, produzido a partir de combustíveis fósseis com emissões significativas de CO₂; **azul**, obtido também de combustíveis fósseis, mas com captura e armazenamento do CO₂ emitido; e **verde**, gerado por eletrólise da água utilizando fontes de energia renovável, sendo a opção mais sustentável devido à ausência de emissões de gases de efeito estufa.

Apesar de tudo isto, Vidyanandan 2018 acredita que, com avanços tecnológicos e esforços globais para expandir a infraestrutura de hidrogénio, os FCEVs podem desempenhar um papel vital na descarbonização do setor de transportes. Para tal, políticas de incentivo à produção de hidrogénio verde e à redução de custos das pilhas de combustível são elementos-chave para acelerar essa transição.

2.3.1 Funcionamento da pilha de combustível

Segundo Denton 2018, as pilhas de combustível utilizadas nos FCEVs são «pilhas de combustível de membrana de troca protónica, também conhecidas como pilhas de combustível de membrana eletrolítica polimérica» (PEMFC, na sigla em inglês), sendo o tipo mais utilizado em aplicações de transporte. As pilhas de combustível (referidas em diante como FC para simplificar) produzem eletricidade através da reação do combustível (neste caso específico, hidrogénio) com oxigénio. A reação entre hidrogénio e oxigénio é exotérmica⁶, e a sua equação química equilibrada é:

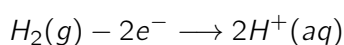


As FC utilizam esta reação entre hidrogénio e oxigénio para produzir energia elétrica e, como convertem uma grande parte da energia química em energia elétrica são, portanto, muito eficientes (Denton 2018). O autor adianta também que as pilhas de combustível são muito fiáveis e silenciosas durante a operação, mas podem ser bastante caras de fabricar, como referido anteriormente. Na Figura 2.13 está ilustrado o funcionamento de uma PEMFC a hidrogénio, que, de acordo com o autor, segue o seguinte processo:

1. O H_2 é passado por um elétrodo (ânodo), que está revestido com um catalisador;
2. O H_2 difunde-se na membrana eletrolítica;
3. Os eletrões são removidos dos átomos de hidrogénio (formando H^+) uma vez que a membrana apenas permite a passagem de protões;
4. Os eletrões, impedidos de passar pela membrana, são forçados a circular através de um circuito externo, gerando corrente elétrica utilizável;
5. O oxigénio (O_2) é introduzido no cátodo;
6. No cátodo, os protões (H^+) que atravessaram a membrana reagem com os eletrões (e^-) provenientes do circuito externo e com o (O_2), formando vapor de água;
7. A água (H_2O) é formada como subproduto de uma reação que envolve os iões de hidrogénio, eletrões e átomos de oxigénio;
8. Os reagentes não utilizados são removidos da célula, juntamente com o vapor de água.

Para os dois elétrodos numa FC a H_2 , as equações equilibradas do processo são as seguintes:

- No cátodo (elétrodo negativo):



⁶Uma **reação exotérmica** é um processo químico que liberta energia para o ambiente, geralmente em forma de calor, devido à menor energia necessária para quebrar as ligações dos reagentes em comparação com a liberada na formação dos produtos da reação.

- No ânodo (elétrodo positivo):

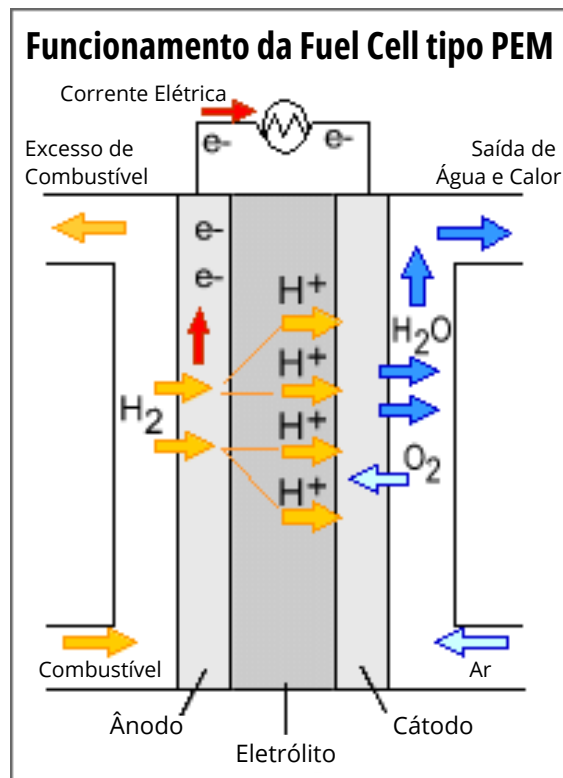
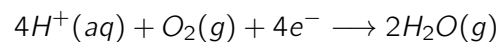


Figura 2.13: Princípio de funcionamento de uma PEMFC.
Adaptado de: Pandian et al. 2010

A reação no cátodo é uma reação de oxidação, uma vez que o hidrogénio perde eletrões, e a reação no ânodo é uma reação de redução, pois os íões de hidrogénio ganham eletrões. A reação global na célula de combustível é portanto, uma reação redox (redução-oxidação).

Segundo Denton 2018, se o calor gerado pela FC for aproveitado (captura de energia), é possível alcançar, além de uma densidade energética muito elevada uma eficiência superior a 80 %, o que de acordo com Vengatesan, Jayakumar e Sadasivuni 2024, é mais do dobro que um MCI eficiente. Além disto, Denton 2018 refere também que a temperatura de operação destes sistemas, apesar de variar, é comum situar-se em torno dos 200 °C. Relativamente a pressões, o autor menciona que estas são também elevadas, «frequentemente na ordem dos 30 bar».

O nome de pilha de combustível é dado ao conjunto de células, que se conectam em série, à semelhança de uma bateria convencional, formando um *stack* que cumpra as solicitações necessárias, nomeadamente tensão e corrente. Denton 2018 afirma que a tensão de circuito aberto teórica de uma pilha de combustível [desta tipologia] é de 1.23V à temperatura ambiente (na prática, situa-se em torno de 1V em circuito aberto). Segundo o autor, sob condições de carga, a tensão da célula varia entre 0.5–0.8V; a tensão do *stack* é geralmente de 400–500V .

Na Figura 2.14 está representado esquematicamente um exemplo possível de ligação do módulo da FC ao equipamento externo que necessita para o seu funcionamento. O exemplo apresentado corresponde à unidade comercializada pela Toyota, que é similar à equipada nos seus modelos H_2 , como por exemplo o Toyota Mirai (Figura 2.15). Este modelo, que atualmente já é comercializado na sua 2ª geração é um dos exemplos que tem vindo a popularizar esta tecnologia.

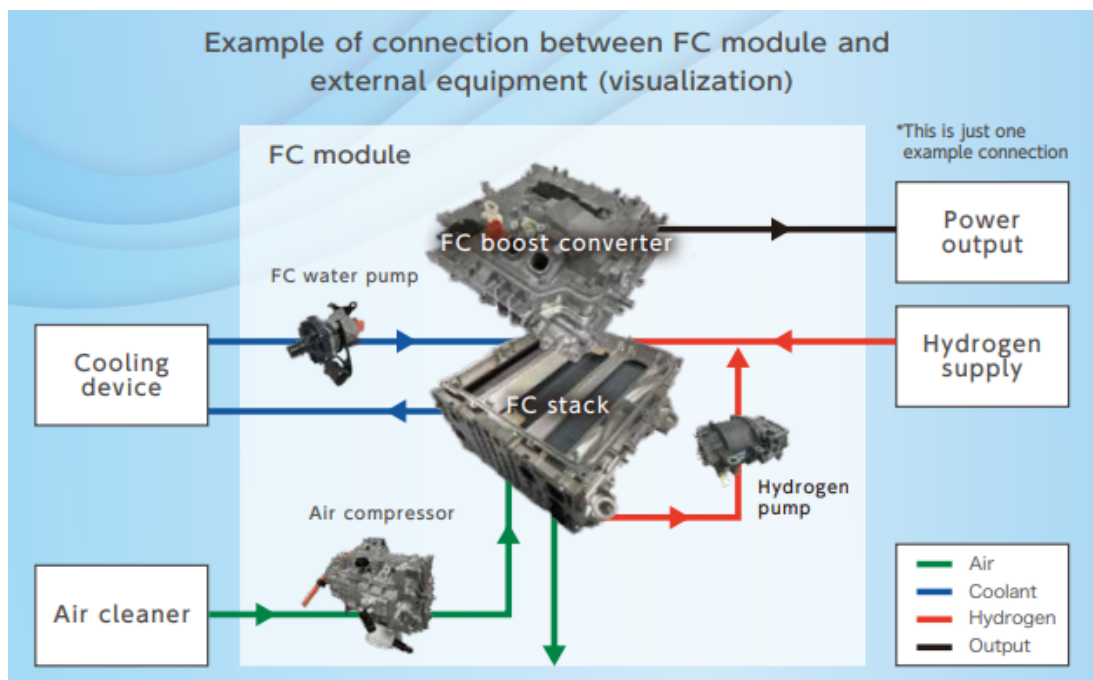


Figura 2.14: Exemplo de esquema de ligação entre o módulo da pilha de combustível da Toyota com equipamento externo.
Retirado de: toyota.co.jp/fuelcells/en/technology

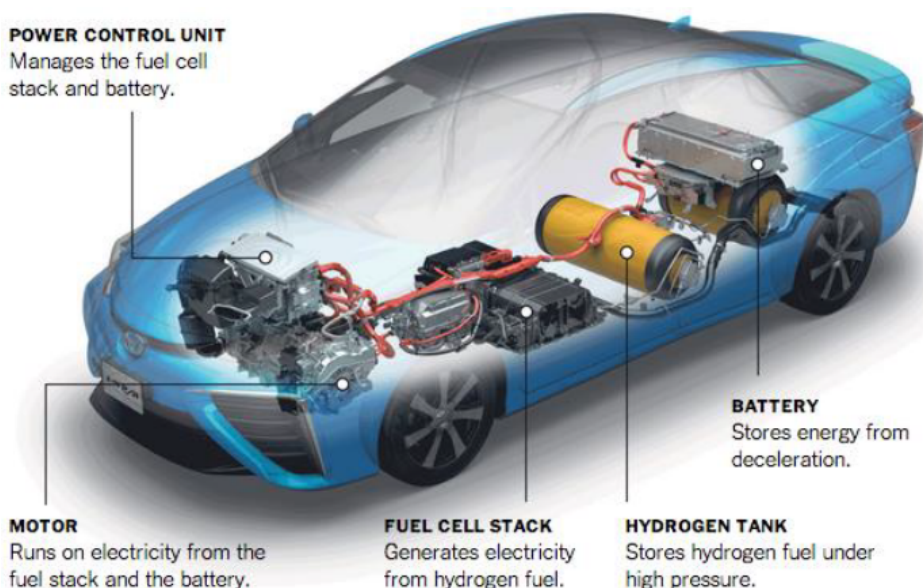


Figura 2.15: Localização dos componentes no Toyota Mirai de 1ª geração.
Retirado de: Sadeq 2024

Na figura 2.16 é possível observar esquematicamente o funcionamento do sistema.

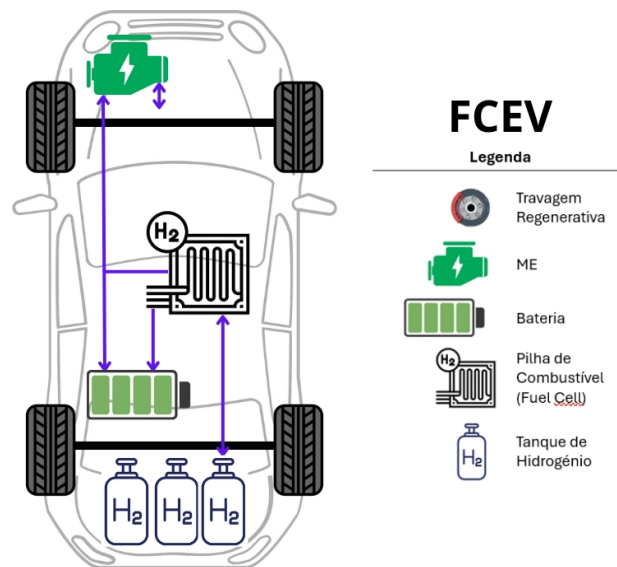


Figura 2.16: Powertrain típico de um Veículo Fuel Cell

2.4 Comparação das Diferentes Tipologias

Como é possível verificar na Figura 2.17, um veículo eletrificado é caracterizado por ter um ou mais motores elétricos e bateria(s), independentemente da sua dimensão. No entanto, as semelhanças ou diferenças vão além disto. Na Tabela 2.3 estão resumidas as principais características relativamente ao *powertrain* das diferentes tipologias e seu funcionamento.

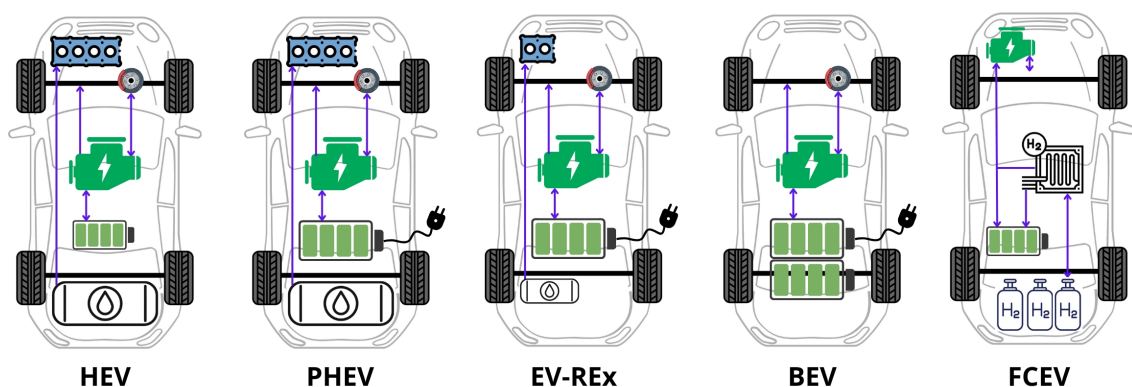


Figura 2.17: Comparação dos Powertrains das diferentes Tipologias dos Veículos Eletrificados mais comuns

É então possível tecer uma comparação geral às diferentes com base no exposto neste capítulo:

- Eficiência elétrica: Os BEVs e FCEVs destacam-se por eliminarem combustíveis fósseis no uso diário.
- Versatilidade: Os PHEVs e EV-REx oferecem flexibilidade para trajetos urbanos e viagens longas, equilibrando operação elétrica e combustíveis.

- Simplicidade de abastecimento: Enquanto o HEV e o PHEV dependem essencialmente de combustível, o BEV exige apenas infraestrutura elétrica e o EV-REx combina ambas as opções. O FCEV depende de hidrogénio.
- Travagem regenerativa: Todos os sistemas utilizam travagem regenerativa para recuperar energia e otimizar a eficiência (em maior ou menor quantidade, dependendo da tipologia).

Tabela 2.3: Quadro resumo das principais tipologias de veículos eletrificados.

	Componentes	Funcionamento	Abastecimento
BEV	ME, bateria	O BEV é 100% elétrico, dependendo exclusivamente da bateria, que é carregada por fontes externas. A travagem regenerativa ajuda a recuperar energia durante a desaceleração, armazenando-a na bateria para uso posterior.	Carregamento em fonte externa
HEV	MCI, ME, bateria, tanque de combustível	O HEV combina o motor elétrico e o motor a combustão, que trabalham de forma complementar. A energia recuperada pela travagem regenerativa ou gerada pelo motor a combustão é armazenada na bateria e reutilizada pelo motor elétrico.	Combustível
PHEV	MCI, ME, bateria, tanque de combustível	O PHEV funciona como um HEV, mas com a vantagem de um alcance significativo em modo elétrico (graças à bateria de maior capacidade). Quando a bateria se esgota, o motor a combustão entra em ação.	Combustível e Carregamento
EV-REx	Gerador (pequeno MCI), ME, bateria, tanque de combustível	O EV-REx opera principalmente como um veículo elétrico puro. Quando a bateria se esgota, o gerador a combustão entra em ação para recarregá-la, estendendo a autonomia sem ligação direta às rodas.	Carregamento e combustível
FCEV	ME, FC Stack, bateria, reservatório de H_2	O FCEV converte hidrogénio em eletricidade através da <i>fuel cell</i> para alimentar o motor elétrico. A energia recuperada pela travagem regenerativa é armazenada na bateria para otimizar o consumo.	Combustível (H_2)

Capítulo 3

Baterias

Independentemente do modo de funcionamento e do seu *powertrain*, todos os veículos eletrificados fazem uso de baterias. Neste capítulo, serão abordadas as temáticas relativamente a esse mesmo assunto: as baterias.

As baterias são sistemas de armazenamento de energia que, na sua essência consistem em várias células dispostas em série e paralelo, onde energia química é convertida em energia elétrica por meio de sucessivas reações eletroquímicas. Relativamente a tamanhos, Deng et al. 2020 referem que os componentes individuais de uma célula de uma bateria de tração são entre 4 a 5 ordens de grandeza menores do que a largura do *pack* completo.

Segundo Martins e Brito 2011, à data, as baterias de tração eram apontadas como uma das principais limitações tanto tecnológicas quanto económicas dos veículos elétricos. Segundo os autores, esta afirmação é justificada, pelo facto de que, em termos tecnológicos, mesmo as baterias mais avançadas, ainda eram bastante volumosas e pesadas em relação à quantidade de energia que conseguem armazenar; por outro lado, sob a perspetiva económica, o custo das baterias representa uma parte significativa do preço total do veículo elétrico. No entanto, entenda-se que estas baterias não só estão presentes em veículos elétricos mas também nas viaturas eletrificadas no geral. Ademais, independentemente da sua fonte de energia para a sua locomoção, todo o veículo e máquina (agrícola ou industrial) faz uso de pelo menos uma bateria, para a alimentação dos seus circuitos elétricos.

Com tudo isso, é notório que o impacto das baterias vai muito além dos vulgos «carros» elétricos, abrangendo uma ampla gama de veículos e sistemas.

3.1 Conceitos de Eletricidade

Para a análise e compreensão dos sistemas de armazenamento de energia elétrica é fundamental entender os conceitos e princípios básicos por detrás do seu funcionamento. Entre os conceitos mais importantes estão a tensão, a corrente, a resistência, a potência e a energia, que se relacionam de forma a possibilitar o uso da eletricidade em diferentes dispositivos, nomeadamente em baterias:

- **Tensão (V):**

É a força que impulsiona os eletrões ao longo de um condutor. Medida em volts (V), a tensão, (ou diferença de potencial) é a principal responsável pela carga e descarga de uma bateria. Em sistemas de armazenamento, a tensão representa a diferença de potencial elétrico entre os terminais da célula ou conjunto de células da bateria, estando relacionada com a quantidade de energia que pode ser transferida por unidade de carga (Bird 2017). Durante o ciclo de carga, a tensão da bateria aumenta à medida

que a energia é armazenada, enquanto durante a descarga, a tensão diminui à medida que a energia é fornecida ao sistema.

- **Corrente (I):**

Medida em amperes (A), a intensidade de corrente (ou simplesmente corrente) é o fluxo de carga elétrica que circula através de um condutor (Bird 2017). Em baterias, a corrente está, à semelhança da tensão, diretamente relacionada à taxa de carga e descarga. A corrente de carga indica a quantidade de carga que a bateria pode armazenar por unidade de tempo, enquanto a corrente de descarga está relacionada à quantidade de energia fornecida pela bateria. A eficiência do ciclo de carga e descarga depende, em grande parte, do controle da intensidade de corrente, uma vez que uma corrente excessivamente alta pode prejudicar a vida útil da bateria.

- **Resistência (R):**

Medida em ohms (Ω), a resistência é a oposição ao fluxo de corrente elétrica. A relação entre tensão, corrente e resistência pode ser descrita pela **Lei de Ohm**, dada por:

$$V = I \times R \quad (3.1)$$

A Lei de Ohm descreve como a resistência de um condutor ou componente elétrico afeta a corrente num circuito (Bird 2017). Quando se analisa baterias, a resistência interna das células é um parâmetro fundamental, uma vez que tem influência direta na eficiência do ciclo de carga (ou descarga). Uma alta resistência interna pode levar a perdas de energia consideráveis, aquecimento excessivo e, por sua vez diminuição da eficiência do armazenamento de energia. A resistência interna das baterias pode ser afetada por fatores como a temperatura, o estado de carga e o desgaste da célula ao longo do tempo.

- **Potência (P):**

Medida em watts (W) - joules por segundo (J/s) no Sistema Internacional de Unidades (SI) - é a quantidade de energia consumida ou gerada por um circuito elétrico por unidade de tempo. A potência é dada pela multiplicação da tensão pela corrente (Bird 2017):

$$P = V \times I \quad (3.2)$$

Em baterias, esta grandeza está relacionada com a capacidade de fornecimento de energia a uma determinada taxa (potência instantânea) durante a descarga. A potência das baterias deve ser dimensionada adequadamente para garantir que forneçam a quantidade necessária de energia sem comprometer a sua eficiência e vida útil. A potência de carga também influencia o tempo necessário para carregar completamente a bateria. O rendimento de um ciclo de carga ou descarga pode ser determinado pela potência envolvida em cada fase do processo.

- **Energia (E):**

A energia elétrica é a capacidade de realizar trabalho através de fenômenos elétricos e é medida em joules (J) em unidades SI, ou, em aplicações mais práticas, como o consumo doméstico e a capacidade de baterias de tração, utiliza-se frequentemente o quilowatt-hora (kWh). A energia elétrica pode ser calculada como o produto da potência (P) pelo tempo (t):

$$E = P \times t \quad (3.3)$$

ou então, considerando a fórmula da potência:

$$E = V \times I \times t \quad (3.4)$$

Esta relação mostra que a energia consumida depende diretamente da tensão aplicada, da corrente que flui pelo circuito e do tempo de funcionamento (Bird 2017).

No contexto das baterias, a energia total armazenada é a medida de quanto trabalho a bateria pode realizar antes de precisar ser recarregada. A energia disponível é determinada pela capacidade da bateria, que depende da sua tensão e da quantidade de carga que pode ser armazenada. Para verificar o rendimento de ciclos de carga e descarga, é essencial medir a energia armazenada, a energia extraída e comparar os valores ao longo dos ciclos, a fim de avaliar perdas e a eficiência global do sistema.

3.1.1 Ligações em Série e Paralelo

Como introduzido acima, as baterias consistem em várias pequenas células ligadas em série e/ou paralelo. A forma como as baterias são interligadas influencia diretamente a tensão e a capacidade do sistema.

- **Ligações em Série:**

Nesta configuração, o terminal negativo de uma bateria é ligado ao terminal positivo da seguinte. O principal efeito é o aumento da tensão total do sistema, que passa a ser a soma das tensões de cada bateria, enquanto a capacidade (em ampere-hora, Ah) permanece igual à de uma única bateria (Baronti et al. 2014). Por exemplo, ao ligar duas baterias de 12 V com 200 Ah em série, resulta num sistema de 24 V com 200 Ah (ver Figura 3.1).

- **Ligações em Paralelo:**

Na ligação em paralelo, todos os terminais positivos das baterias são conectados entre si, assim como todos os terminais negativos. Aqui, a tensão do sistema mantém-se igual à de uma única bateria, mas a capacidade total é a soma das capacidades individuais. Esta configuração é ideal para aumentar a autonomia do sistema, prolongando o tempo de funcionamento sem alterar a tensão de operação (Baronti et al. 2014). Assim, duas baterias de 12 V com 200 Ah em paralelo equivalem a um sistema de 12 V, mas com 400 Ah (ver Figura 3.1).

Na construção de um sistema com múltiplas células é importante garantir que, em série, todas as baterias devem ter capacidades idênticas para evitar desequilíbrios e possíveis danos. Da mesma forma, em paralelo, é fundamental que todas as baterias tenham a mesma tensão nominal para prevenir fluxos de corrente indesejados. Em adição, em ambos os casos, a utilização de baterias do mesmo tipo, marca e estado de saúde é recomendada para garantir segurança e eficiência do sistema.

3.2 Tipos de Baterias

No setor automóvel, é correto afirmar que as baterias desempenham um papel central, sendo responsáveis por armazenar e fornecer energia elétrica para diferentes funções e circuitos de um veículo. Existem dois tipos principais de baterias utilizadas na área automóvel: as baterias de tração e as baterias de alimentação. Cada uma delas é projetada para cumprir

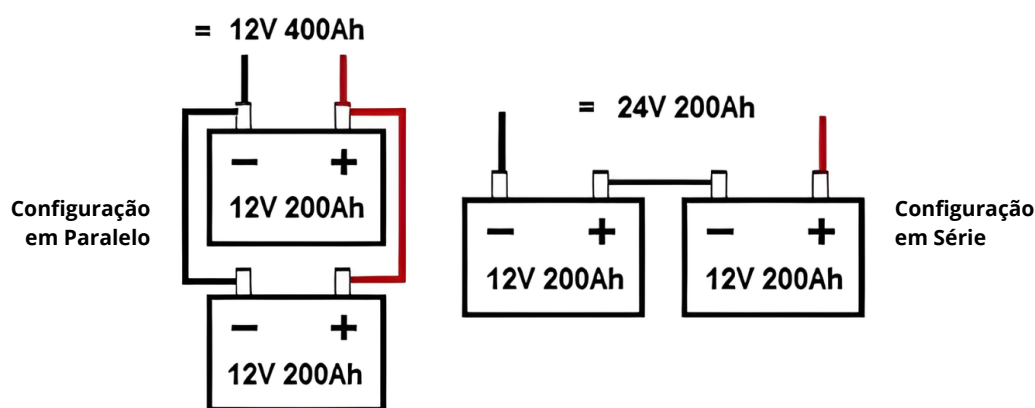


Figura 3.1: Configuração de duas baterias em paralelo e em série.
Adaptado de: Eliseo Sebastian - Energia Solar

funções específicas, atendendo às solicitações de desempenho e durabilidade necessárias para diferentes aplicações.

Enquanto as baterias de tração fornecem energia para a propulsão de veículos elétricos e híbridos, as baterias de alimentação (tipicamente de 12 V) são responsáveis por suportar sistemas auxiliares, sendo amplamente utilizadas tanto em veículos eletrificados quanto em veículos convencionais com motores a combustão interna, como os movidos a gasolina e diesel (Beard 2019; James Larminie 2012).

3.2.1 Baterias de Tração

As baterias de tração têm como principal função alimentar o motor elétrico que impulsiona o veículo. Estas baterias são projetadas para armazenar grandes quantidades de energia e libertá-la de forma eficiente e contínua durante a operação do veículo. Segundo Pistoia 2009, a alta densidade energética e a capacidade de suportar ciclos frequentes de carga e descarga profunda são características que tornam este tipo de bateria ideal para veículos eletrificados. As baterias de tração são tipicamente caracterizadas por:

- Alta densidade de energia, permitindo cada vez mais dotar os veículos eletrificados de maior autonomia (Beard 2019);
- Capacidade de suportar descargas profundas, mantendo o desempenho mesmo com repetidos ciclos de utilização intensa (Pistoia 2009);
- Longa vida útil, sendo projetadas, em teoria, para operar por vários anos, dependendo do tipo e das condições de uso (Denton 2020).

A este tipo de baterias podem ser aplicadas várias tecnologias. Neste momento, as baterias de tração mais utilizadas em veículos são construídas com a tecnologia de íons de lítio (*Li-ion*), podendo estas ter várias variantes. Na secção 3.5 estão explicadas as principais tecnologias presentes em veículos eletrificados.

3.2.2 Baterias de Alimentação

As baterias de alimentação são encontradas em praticamente todos os veículos, sejam eles eletrificados ou convencionais com MCI. A principal função destas baterias é fornecer energia para o sistema de arranque do motor, além de alimentar os sistemas elétricos auxiliares,

como iluminação, rádio, ar-condicionado, sensores e outros equipamentos (Beard 2019). Por este motivo, estas baterias devem ser capazes de lidar com picos rápidos de correntes elevadas, com capacidade de descarga rápida e curta duração, nomeadamente para a situação de arranque de um veículo a combustão, onde é necessário fornecer uma explosão inicial de energia para o arranque do motor, retomando a carga rapidamente com o auxílio do alternador (Pistoia 2009).

De entre os tipos de baterias de alimentação mais comuns, listam-se:

- **Baterias de Chumbo-Ácido:**

É a tecnologia padrão no mercado devido ao custo acessível, fiabilidade e capacidade de fornecer picos de energia. Estas baterias, normalmente de 12V, são amplamente utilizadas em veículos com motor de combustão interna (Beard 2019);

- **Baterias Seladas (VRLA):**

Incluem as baterias *AGM* (Absorbent Glass Mat) e Gel, que são livres de manutenção e oferecem maior segurança contra derrames. São utilizadas em veículos modernos com maior solicitação de energia, devido a sistemas como p. ex. o *start-stop* (Valorcar 2019).

3.3 Propriedades das Baterias utilizadas nos VEs

Segundo Amer et al. 2024, o desenvolvimento de baterias registou progressos significativos nos últimos anos. Comparando com os registos do ano de 2017, a produção mundial de baterias para veículos exclusivamente elétricos aumentou cerca de 180 % em 2022, devendo-se este aumento provavelmente ao aumento da procura por este tipo de veículos. De acordo com os mesmos autores, as previsões apontam para que a procura de baterias continue a aumentar. Para estabelecer distinção entre as inúmeras baterias existentes no mercado, são várias as características que as diferenciam, entre as quais destacam-se:

- **Capacidade:**

A dificuldade e o custo de armazenamento são um dos principais problemas da energia elétrica aplicada aos veículos. Atualmente, os principais fabricantes de baterias fazem grandes investimentos económicos no desenvolvimento de novas baterias com maior eficiência e fiabilidade, melhorando, assim, a capacidade de armazenamento das baterias (Sanguesa et al. 2021). A capacidade da bateria representa a quantidade máxima de energia que pode ser extraída da bateria sob determinadas condições especificadas. Esta unidade pode ser expressa em ampere-hora (Ah) ou kilowatt-hora (kWh), embora esta última seja mais comumente utilizada nas baterias de tração encontradas em viaturas eletrificadas. A capacidade da bateria de um VE é uma consideração crítica, uma vez que tem um impacto direto na autonomia do veículo (Amer et al. 2024).

No que à capacidade das baterias diz respeito, Sanguesa et al. 2021 realizaram um estudo de forma a avaliar a evolução das soluções presentes no mercado. A tabela do Apêndice A apresenta dados relacionados com as capacidades das baterias de alguns veículos elétricos. Com os dados apresentados nessa mesma tabela, os autores construíram o gráfico da Figura 3.2. Como destacado pela linha de tendência, «a capacidade das baterias está em contínuo crescimento». Aos dias de hoje, já se verifica a existência de veículos com baterias superiores a 100 kWh.

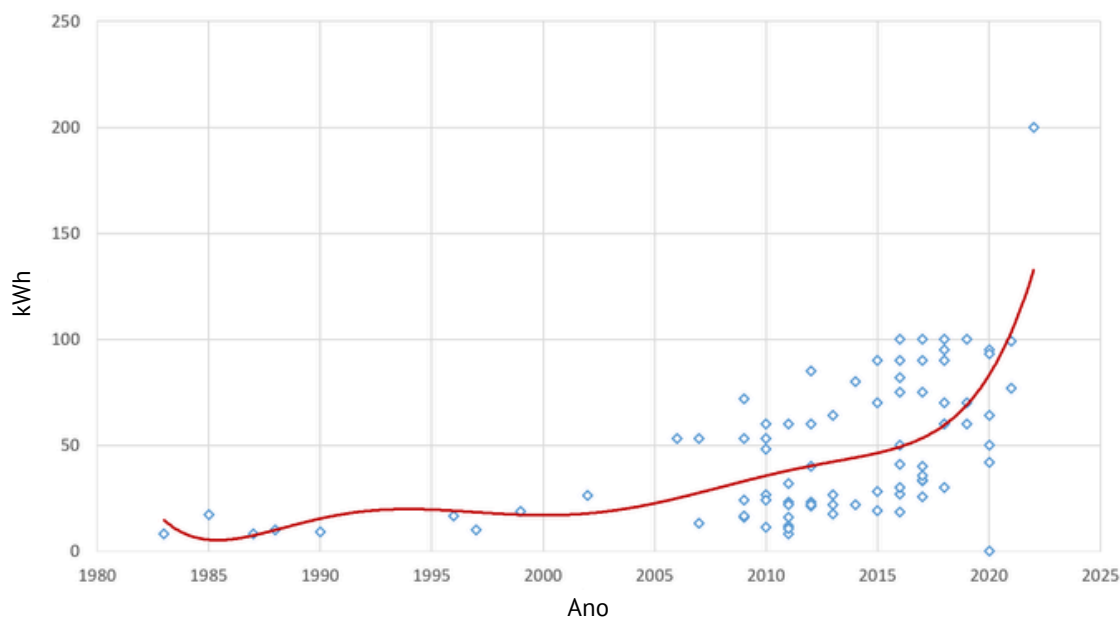


Figura 3.2: Evolução da capacidade das baterias desde 1980 até 2020.

Adaptado de: Sanguesa et al. 2021

- **Densidade Energética:**

Obter a maior densidade energética possível é um aspeto importante no desenvolvimento de baterias, ou seja, que, com o mesmo tamanho e peso, uma bateria seja capaz de acumular uma maior quantidade de energia (Sanguesa et al. 2021). O termo densidade de energia é também conhecido como densidade de energia volumétrica e expressa a energia nominal por unidade de volume, medido em watt-hora por litro (Wh/L). Tipicamente, os consumidores estão mais preocupados com a autonomia de condução dos VEs, que é significativamente afetada pela densidade energética da bateria. No desenvolvimento de baterias, é importante alcançar a maior densidade de energia possível, o que significa que uma bateria do mesmo tamanho (volume) pode acumular mais energia (Amer et al. 2024).

- **Energia Específica:**

A energia específica de uma bateria representa a quantidade de energia que esta é capaz de fornecer em relação à sua massa (Wh/kg). Esta propriedade, também chamada de densidade energética gravimétrica, determina a quantidade de peso da bateria necessária para atingir uma determinada autonomia elétrica (Amer et al. 2024).

- **Potência Específica:**

A potência específica de uma bateria está relacionada com a sua energia específica e pode ser definida como a sua potência por unidade de peso (W/kg). No entanto, específica a quantidade de energia que uma bateria pode fornecer para um determinado peso. Ao contrário da energia específica, a potência específica não tem qualquer relação com a autonomia máxima que um VE pode percorrer sem recarregar (Amer et al. 2024).

- **Vida Útil:**

Para maximizar o desempenho da bateria, as células das baterias em veículos eletrificados são comprimidas em módulos para reduzir o inchaço, mas também ligadas

firmemente à placa de refrigeração para melhorar a eficiência do arrefecimento. Substituir uma célula de um conjunto geralmente requer a remontagem de todo o módulo e a substituição da placa de refrigeração danificada, o que pode ser dispendioso. Respeitando estes parâmetros, a meta de vida útil para baterias, em particular de BEVs, é de 15 anos. **A vida útil de uma bateria é o período**, normalmente em anos (ou n° de ciclos), **no qual retém pelo menos 80 % da capacidade original** da bateria, isto é, quando nova (Deng et al. 2020). De outra forma, se a capacidade de uma determinada bateria for inferior a 80 % da capacidade de quando nova, diz-se que a sua vida útil já terminou e recomenda-se a sua substituição, podendo esta ser ainda utilizada para outros fins que não a mobilidade veicular (p. ex. aplicação em sistemas estacionários).

Devido à forte reatividade entre o eletrólito e o eletrodo, a perda de capacidade nas baterias, seja durante os ciclos de carga/descarga ou por envelhecimento térmico, é quase inevitável. De forma a ajudar a prolongar a vida útil de uma bateria é necessário, em projeto, uma boa compreensão dos mecanismos de degradação, a escolha apropriada de materiais e a gestão das condições de funcionamento (Deng et al. 2020).

À medida que o volume de VEs aumenta rapidamente nos últimos anos, como utilizar as baterias destes após o fim da sua vida útil tem gerado grande interesse:

- Reciclagem: Uma forma é reciclar as baterias de EVs, o que é vantajoso quando contêm metais de elevado valor, como o cobalto, uma vez que a reciclagem fornece fontes adicionais de abastecimento. No entanto, o processo de extração de metais valiosos das baterias ainda é atualmente dispendioso.
- Reutilização: Outra forma é reutilizá-las em aplicações menos exigentes, como o armazenamento estacionário de energia. Um dos desafios da reutilização das baterias de VEs é que estas têm formatos, estruturas e químicas drasticamente diferentes, e os padrões para especificar o seu desempenho não estão bem definidos (Deng et al. 2020).

- **Auto-Descarga:**

A auto-descarga é um fenómeno indesejado que ocorre em todas as baterias, resultando na perda gradual de carga armazenada ao longo do tempo, mesmo quando a bateria não está em uso. Este processo é impulsionado pelas mesmas forças termodinâmicas que atuam durante a descarga intencional da bateria, tornando-o um desafio intrínseco no campo do armazenamento de energia (Holze 2022). Segundo Holze 2022, a auto-descarga ocorre com duas principais causas:

- Correntes Parasitas, que ocorrem devido a caminhos condutores não intencionais entre os polos da bateria, podendo manifestar-se:
 - (a) Internamente: Através de separadores que não são completamente isolantes. Os separadores são componentes cruciais das baterias, projetados para isolar eletricamente os eletrodos positivo e negativo. No entanto, se o separador não estiver livre de imperfeições ou degradação, podem surgir pequenos «caminhos» condutores, permitindo um fluxo de corrente indesejado entre os eletrodos (Holze 2022).
 - (b) Externamente: Por meio de contactos elétricos parasitas entre massas ativas.

Isso pode ocorrer devido à migração de partículas condutoras entre os eletrodos ou à formação de dendrites metálicas que podem criar pontes condutoras entre os eletrodos (Holze 2022).

As correntes parasitas são particularmente problemáticas em baterias de alta tensão, onde a área superficial dos eletrodos é maior, proporcionando mais oportunidades para a ocorrência desses caminhos condutores não intencionais (Holze 2022).

– Reações Químicas, por meio de várias formas:

(a) Interações entre massas ativas e constituintes da solução eletrolítica:

Estas reações podem resultar na dissolução gradual dos materiais ativos dos eletrodos ou na formação de compostos que reduzam quimicamente a capacidade da bateria (Holze 2022).

(b) Formação e degradação da interface sólido-eletrólito (SEI) em baterias de lítio:

A SEI é uma camada protetora que se forma na superfície do eletrodo negativo em baterias de lítio. Embora seja essencial para a estabilidade da bateria, a sua formação contínua e degradação contribuem para a auto-descarga. A formação da SEI consome lítio ativo, reduzindo a capacidade da bateria, além de que a sua degradação pode expor o eletrodo a mais reações indesejadas (Holze 2022).

(c) Corrosão de eletrodos (em baterias de chumbo-ácido):

Neste caso, o eletrodo de chumbo reage lentamente com o ácido sulfúrico do eletrólito, liberando pequenas quantidades de hidrogênio e íons de chumbo. Este processo de corrosão contribui para a auto-descarga e conduz à degradação gradual da bateria (Holze 2022).

(d) Reações de decomposição do eletrólito:

Em alguns sistemas de bateria, o eletrólito pode-se decompor lentamente, especialmente a alta temperatura ou tensão. Isto não apenas consome a carga armazenada, mas também pode produzir gases que aumentam a pressão interna da bateria.

(e) Reações redox com impurezas:

Impurezas presentes nos materiais da bateria ou introduzidas durante o fabrico podem provocar reações redox indesejadas, contribuindo para a auto-descarga.

Estes mecanismos de auto-descarga são influenciados por vários fatores, incluindo a temperatura, o estado de carga da bateria, a idade da bateria e o número de ciclos de carga/descarga. A compreensão detalhada desses mecanismos é crucial para o desenvolvimento de estratégias eficazes para mitigar a auto-descarga e melhorar o desempenho geral das baterias (Holze 2022).

Além das causas apresentadas, existem diversos fatores que podem influenciar a auto-descarga, a saber:

– Temperatura:

As taxas de auto-descarga aumentam tipicamente com temperaturas mais elevadas. Este efeito é particularmente pronunciado em baterias de níquel-cádmio,

onde temperaturas acima de 60°C podem tornar a auto-descarga tão drástica que impossibilita a carga completa da bateria.

- Química da bateria:
Diferentes sistemas apresentam diferentes taxas de auto-descarga. Por exemplo, baterias de níquel-metal hidreto ($Ni - MH$) tendem a ter taxas de auto-descarga mais altas que as baterias de íões de lítio.
- Idade da bateria e número de ciclos:
Células mais antigas e com mais uso tendem a apresentar maior auto-descarga. Tal deve-se à degradação dos materiais ativos e à formação de produtos de reação que catalisam processos de auto-descarga.

Como a auto-descarga de baterias é de todo crítica, têm surgindo, de acordo com Holze 2022, alguns avanços tecnológicos e metodologias para mitigar este fenómeno, tais como:

- Projeto cuidadoso da célula, onde se inclui a seleção de materiais de alta pureza e o design de separadores mais eficientes.
- Uso de inibidores, uma vez que a adição de compostos específicos à solução eletrolítica pode retardar reações químicas indesejadas.
- Controlo de temperatura, de forma a manter as baterias em ambientes com temperatura controlada, o que pode reduzir significativamente a auto-descarga.
- Desenvolvimento de baterias de baixa auto-descarga (LSD), que utilizam materiais e designs especializados para minimizar a auto-descarga, sendo especialmente populares no formato $Ni - MH$,

- **Temperatura de Operação:**

A temperatura de operação de uma bateria refere-se à faixa de temperaturas que esta pode operar em determinado ambiente. Para que as baterias dos VE operem dentro de uma faixa de temperatura adequada, estas devem ser controladas termicamente e impedidas de sofrer degradação. Um dos problemas mais difíceis que a indústria automóvel enfrenta é o fornecimento de mecanismos de gestão térmica adequados para evitar o fenómeno de *thermal runaway* (ver secção 4.1.2)(Amer et al. 2024).

3.4 Parâmetros de Controlo em Baterias

De forma a garantir uma operação segura e eficiente das baterias, bem como otimizar sua vida útil, é fundamental monitorizar e compreender os principais parâmetros de controlo, como o Estado de Carga (SoC), o Estado de Saúde (SoH), a Profundidade de Descarga (DoD) e a Eficiência. Estes parâmetros, passíveis de serem medidos/calculados, fornecem informações cruciais sobre o desempenho e as condições operacionais dos sistemas de armazenamento de energia.

- **Estado de Carga - State of Charge (SoC):**

O estado de carga (SoC, do inglês *State of Charge*) é uma medida da quantidade de energia restante numa bateria em comparação com uma referência de energia que tinha quando estava completamente carregada. No entanto, definir o SoC é mais difícil do que pode parecer à primeira vista. A referência pode ser:

- A capacidade nominal, como quando nova;

- A capacidade mais recente de carga-descarga (Denton 2020).

No entanto, este indicador pode ser problemático. Ora veja-se o seguinte exemplo: Um dado veículo tem uma autonomia elétrica de 100 km com uma bateria nova completamente carregada, pelo que, se SoC = 50 %, a autonomia restante seria de 50 km. No entanto, após vários anos, a capacidade da bateria quando completamente carregada decresce para 50 % do que era inicialmente. Nestas condições, uma indicação de 50 % de carga agora só proporcionaria uma autonomia de 40 km (Denton 2020). Vários métodos têm sido utilizados para estimar o estado de carga de uma bateria, sendo alguns destes específicos para determinadas químicas de células (Denton 2020). O método mais simples para monitorizar o SoC é a medição da tensão, onde determinado valor de tensão corresponde um valor de SoC (Apêndice B), mas isto depende de vários fatores:

- A tensão em circuito aberto (OCV) será maior do que quando a corrente está a fluir, devido à resistência interna das células;
- O efeito significativo da temperatura;
- A maioria das tecnologias de baterias operam, na prática, entre 80 % e 20 % de carga (os chamados ciclos parciais), para reduzir a degradação ao longo do tempo e, por isso, as variações de tensão são ainda menores (Denton 2020).

Ainda assim, tendo em conta todos os fatores, uma medição de tensão sob uma carga conhecida proporciona uma estimativa razoável do SoC. Também é possível calcular o estado de carga medindo a corrente e o tempo (entrada ou saída). Corrente multiplicada pelo tempo dá um valor adequado para o SoC. Infelizmente, existem alguns problemas com isto:

- A corrente de descarga varia de forma não linear à medida que a bateria se descarrega;
- Para saber quanta carga contém, a bateria tem de ser descarregada;
- Há perdas durante o ciclo de carga/descarga (Denton 2020).

É sabido que uma bateria entregará sempre menos durante a descarga do que foi introduzido durante a carga. Isto é, por vezes, descrito como a eficiência coulômbica da bateria (*coulombic efficiency of the battery*), onde a temperatura, mais uma vez, é um problema. Contudo, se todos os fatores forem considerados, pode ser calculado um valor razoável para o estado de carga. A maioria dos fabricantes de baterias utiliza Coulombs «entrados» e «saídos» como referência para as suas garantias (Denton 2020).

- **Estado de Saúde - State of Health (SoH):**

O estado de saúde (SoH, do inglês *State of Health*) de uma bateria indica a condição geral de uma bateria e o seu desempenho comparada a bateria nova. Leva em consideração a aceitação de carga, a resistência interna, a tensão e a auto-descarga. O SoH é uma indicação, não uma medição absoluta. Durante o tempo de vida de uma bateria, o seu desempenho deteriora-se devido a alterações físicas e químicas. Infelizmente, não há uma definição universalmente aceite para o SoH (Denton 2020).

Por um lado, a impedância¹ ou condutividade das células é frequentemente usada como uma estimativa razoável do SoH. Sistemas mais complexos monitorizam outros parâmetros e envolvem uma série de cálculos. Como o SoH é um valor relativo à condição de uma bateria nova, o sistema de medição deve recolher e guardar dados ao longo do tempo e monitorizar as alterações (Denton 2020). Alternativamente, a contagem os ciclos de carga/descarga da bateria é uma medida do uso da bateria e pode ser utilizado para indicar o SoH, se comparado com os valores esperados ao longo do tempo. Isto porque, considerando por exemplo uma bateria de iões de lítio, a capacidade de uma das suas células deteriora-se de forma bastante linear com a idade ou com o número de ciclos. A vida útil restante dos ciclos pode, assim, ser utilizada como uma medida do SoH (Denton 2020).

- **Profundidade de Descarga - Depth of Discharge (DoD):**

A profundidade de descarga (DoD, do inglês *Depth of Discharge*) de uma bateria é a medição de quanto da energia armazenada de uma bateria é utilizada durante um único ciclo de carga/descarga, expresso como uma percentagem da capacidade total da bateria, isto é, quantifica quanto do potencial de uma bateria é aproveitado num único ciclo. Níveis elevados de DoD, onde uma bateria é profundamente descarregada antes de ser recarregada, podem acelerar significativamente os processos de degradação (Yüksek e Alkaya 2023).

Existem inúmeros fatores críticos afetados por valores de DoD particularmente altos, a saber:

- Reações eletroquímicas complexas que ocorrem nas células da bateria:
Um DoD elevado pode levar a reações químicas mais extensas e intensas, provocando alterações na estrutura interna e na química dos materiais da bateria. Estas alterações, ao longo do tempo, contribuem para a perda gradual de capacidade da bateria (Yüksek e Alkaya 2023).
- Stress térmico:
Quando uma bateria é descarregada a um nível elevado de DoD, há um aumento no fluxo de corrente, resultando na maior produção de calor. Este excesso de calor pode causar stress térmico dentro da bateria e até provocar danos irreversíveis nos seus componentes (Yüksek e Alkaya 2023).
- Stress mecânico:
À medida que uma bateria é descarregada a níveis mais profundos, o volume de materiais ativos nos elétrodos expande e contrai-se de forma mais dramática. Este stress mecânico pode levar à degradação física, como fissuras nos elétrodos ou danos no separador, ao longo de repetidos ciclos (Yüksek e Alkaya 2023).

A perda de capacidade é uma consequência notável de um DoD elevado, na maioria das tipologias de baterias. Isto significa que a capacidade total da bateria diminui gradualmente a cada ciclo, reduzindo a sua capacidade de armazenar e fornecer energia de forma eficiente ao longo do tempo, reduzindo substancialmente a vida útil da bateria (Yüksek e Alkaya 2023).

- **C-rate:**

O C-rate é um rácio (rácio C) que quantifica a velocidade a que uma bateria carrega

¹Grandeza complexa que generaliza o conceito de resistência elétrica para circuitos em corrente alternada (AC), englobando a componente resistiva e a reativa, associada a indutâncias e capacitâncias. Em corrente contínua (DC), como no caso da descarga de baterias, a impedância reduz-se à resistência elétrica.

ou descarrega em relação à sua capacidade, normalmente expressa como um múltiplo da sua capacidade nominal. O C-rate influencia significativamente as reações eletroquímicas que ocorrem dentro da bateria: quando submetida C mais altos, a bateria passa por ciclos de carga/descarga mais rápidos, provocando reações químicas mais intensas nas suas células. Estas reações aceleradas podem contribuir para um processo de degradação mais rápido (Yüksek e Alkaya 2023).

Além disso, os C elevados levam a um aumento do fluxo de corrente, gerando calor excessivo dentro da bateria, o que pode ser prejudicial (devido ao stress térmico que acelera a deterioração da bateria). Isto não só compromete os componentes da bateria, como também aumenta os riscos de segurança, incluindo o risco de *thermal runaway*. Internamente, as baterias resistem naturalmente ao fluxo de corrente elétrica. Com rácios mais elevados, esta resistência interna torna-se mais pronunciada, resultando em quedas de tensão e menor eficiência energética. Consequentemente, a capacidade utilizável da bateria diminui, prejudicando o seu desempenho geral. (Yüksek e Alkaya 2023)

De forma mais simplificada, o C-rate fornece uma indicação da rapidez de carga/descarga de uma bateria. C-rate = 1 C significa que a bateria pode ser carregada/descarregada com o mesmo valor de Ah. Vejam-se alguns exemplos de correspondência na Tabela 3.1 e de cálculo na Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Exemplos de correspondência para diferentes valores de C-rate

$$\underline{\underline{1 \text{ h} = 1 \text{ C} \quad 3 \text{ h} = 0.33 \text{ C} \quad 5 \text{ h} = 0.2 \text{ C}}}$$

Tabela 3.2: Exemplos de cálculo com C-rate

Bateria	Carga/Descarga
5 Ah 0.2 C	$5 \times 0.2 = 1 \text{ A}$ em $\frac{1}{0.2} = 5$ horas ($\frac{60}{0.2} = 300$ minutos)
5 Ah 1 C	5 A em 1 hora
5 Ah 20 C	$5 \times 20 = 100 \text{ A}$ em $\frac{1}{20} = 0.05$ horas ($\frac{60}{20} = 3$ minutos)

Dado que os motores de tração necessitam de correntes elevadas, as baterias de viaturas elétricas/híbridas tem valores até 25 a 30 C.

- **Eficiência:**

De forma geral, a eficiência refere-se à percentagem de energia disponibilizada pela bateria em relação à energia carregada (Sanguesa et al. 2021).

3.5 Tecnologias Existentes

Como referido até aqui, existem numerosas tecnologias construtivas aplicadas às baterias, sejam estas baterias de alimentação ou baterias de tração. Nesta secção, irão ser abordadas as principais tecnologias para ambas as utilizações.

3.5.1 Bateria de Chumbo-Ácido - $Pb - PbO_2$

A bateria de chumbo-ácido é o dispositivo eletroquímico recarregável mais antigo e mais amplamente utilizado em automóveis (todos os automóveis e veículos no geral possuem pelo menos uma bateria de chumbo-ácido, as chamadas baterias de 12 V - Figura 3.3), fontes de alimentação ininterrupta (UPS) e sistemas de reserva para telecomunicações e muitas outras aplicações (Kitaronka 2022). Segundo os autores, este acumulador de energia «funciona através de reações químicas que envolvem dióxido de chumbo (elétrodo catódico), chumbo (elétrodo anódico, normalmente esponjoso ou poroso) e ácido sulfúrico» (ver Figura 3.4). As baterias de chumbo-ácido têm uma elevada eficiência de carga/descarga, são baratas e fáceis de instalar. No entanto, são também conhecidas as desvantagens destas baterias, que englobam baixa densidade energética, ciclo de vida curto, toxicidade devido à utilização de ácido sulfúrico e o potencial perigo para o ambiente (Kitaronka 2022).

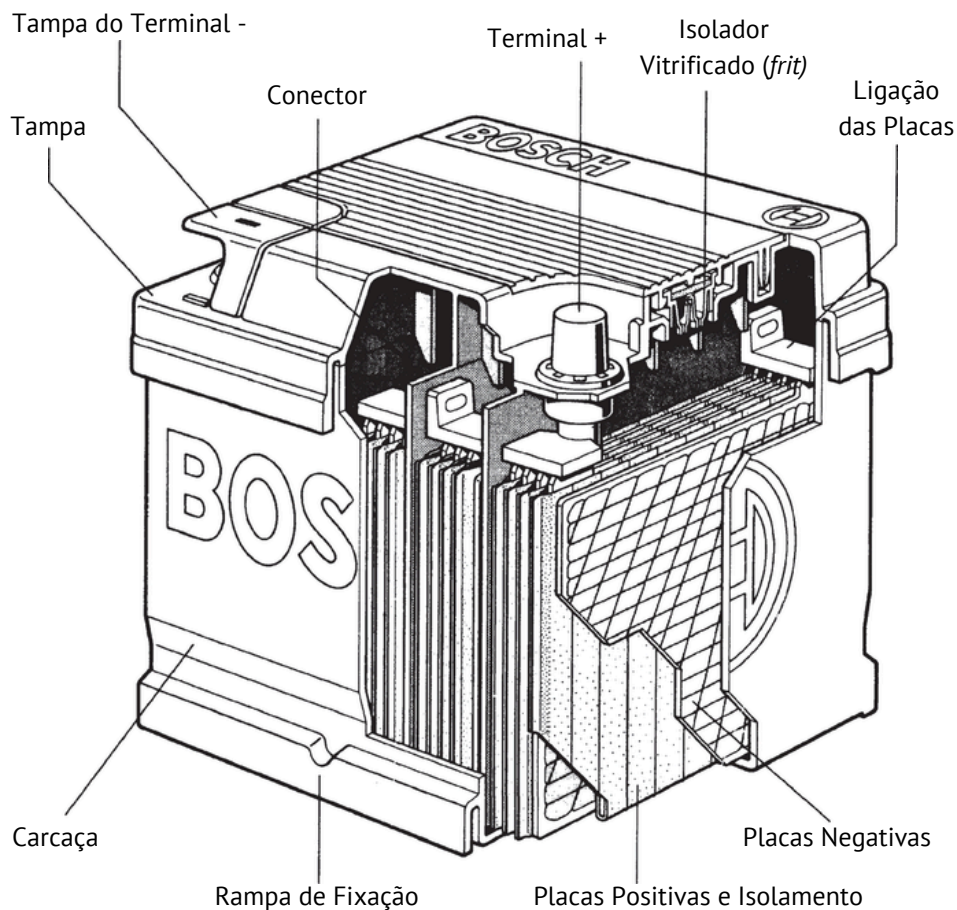
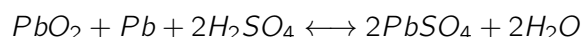


Figura 3.3: Bateria Bosch 12V em corte.

Adaptado de: Denton 2020

Ambos os elétrodos estão imersos numa solução eletrolítica de ácido sulfúrico e água (35 e 65 %, respetivamente) (Amer et al. 2024). No caso dos elétrodos entrarem em contacto um com o outro através do movimento físico da bateria ou através de alterações na espessura dos elétrodos, uma membrana eletricamente isolante, mas quimicamente permeável, separa os dois elétrodos. Esta membrana também impede o curto-circuito elétrico através do eletrólito (Kitaronka 2022).

A reação química global é:



Conforme afirmado por Kitaronka 2022, a descarga de uma pilha leva à formação de cristais de sulfato de chumbo nos terminais negativo e positivo (visível na Figura 3.4), bem como a libertação de eletrões devido à alteração da carga de valência do chumbo. «A formação deste sulfato de chumbo utiliza o sulfato do eletrólito de ácido sulfúrico que envolve a bateria e, como resultado, o este torna-se menos concentrado». Assim sendo, a descarga completa resultaria em ambos os elétrodos cobertos com sulfato de chumbo e água, em vez de ácido sulfúrico e, uma vez que os dois elétrodos seriam do mesmo material, não existiria potencial químico ou tensão entre eles - a bateria «morreria» (Kitaronka 2022).

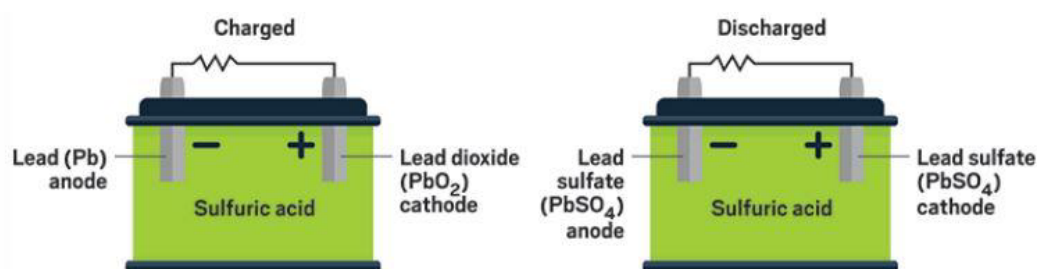


Figura 3.4: Representação esquemática de uma bateria de chumbo-ácido em carga e descarga, evidenciando as transformações químicas dos elétrodos. À esquerda, bateria carregada, com elétrodo negativo de chumbo (Pb) e positivo de dióxido de chumbo (PbO_2). À direita, bateria descarregada, com ambos os elétrodos convertidos em sulfato de chumbo ($PbSO_4$). O eletrólito é ácido sulfúrico nas duas situações.

Retirado de: Kitaronka 2022

Na prática, a descarga para na tensão de corte, muito antes deste ponto, pelo que, a bateria não deverá ser descarregada abaixo desta tensão. Entre o estado totalmente descarregado e o estado carregado, uma bateria de chumbo-ácido regista uma redução gradual da tensão. No Apêndice B encontra-se listado o estado de carga (SoC), em valores típicos, de uma bateria desta tipologia, em função da tensão registada aos seus terminais. Conforme indicado na Tabela B.1, se a bateria for deixada em estados de carga baixos durante longos períodos de tempo, são-lhe induzidos danos permanentes devido ao crescimento de grandes cristais de sulfato de chumbo. «Estes cristais maiores são diferentes da estrutura porosa típica do elétrodo de chumbo e são difíceis de converter novamente em chumbo» (Kitaronka 2022).

Tal como refere Kitaronka 2022, esta é uma tecnologia económica e bem estudada. Embora apresentem a desvantagem de utilizar materiais perigosos como chumbo e ácido sulfúrico, este problema é parcialmente mitigado pelo facto de as baterias de chumbo-ácido serem altamente recicladas no mercado atual. Veja-se o exemplos dos EUA, onde, em 2015, a taxa de reciclagem se situava entre 95 e 98%. A contribuir para os elevados índices de reciclagem está o valor residual das baterias usadas, tanto para os utilizadores finais como para os centros de reciclagem. Estas baterias são frequentemente revendidas através de centros de distribuição, baseando-se no «valor de núcleo», ou seja, o valor das matérias-primas que podem ser recuperadas durante o processo de reciclagem (Warner 2015).

Outro dos argumentos frequentes a favor das baterias de chumbo-ácido mencionados por

Warner 2015 é a existência de muitos tamanhos padronizados disponíveis, tornando-as altamente «standardizadas». O BCI (*Battery Council International*) criou um dos métodos de categorização mais utilizados que, além das características dimensionais, também são utilizados a tensão, configuração do terminal e posição do terminal para gerar estas categorias.

Na sua essência, existem dois tipos de baterias de chumbo-ácido sendo estas as baterias de arranque e as de ciclo profundo. A bateria de arranque (SLI - arranque, luz e ignição, do inglês *starting light ignition*) foi concebida para fornecer rajadas rápidas de energia (como no arranque de motores) e, por isso, tem um maior número de placas. As placas são mais finas e têm uma composição de material ligeiramente diferente (Kitaronka 2022).

Por outro lado, a bateria de ciclo profundo tem menos energia instantânea, mas um maior fornecimento de energia a longo prazo. As baterias de ciclo profundo têm placas mais espessas e podem sobreviver a muitos ciclos de descarga. As baterias de arranque não devem ser utilizadas em aplicações de ciclo profundo, uma vez que as placas mais finas são mais suscetíveis de se deformarem e sofrerem danos (Kitaronka 2022).

Nos veículos mais recentes, as baterias de chumbo-ácido utilizadas «são conhecidas como sistemas de armazenamento de baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA) (fixas ou não derramáveis). As baterias VRLA só podem ser abertas em determinadas configurações. Além disso, são menos suscetíveis de sulfatar ou degenerar do que as células húmidas, o que as torna muito seguras» (Amer et al. 2024). Dentro da categoria de baterias VRLA destacam-se as Baterias de Gel e as Baterias *AGM*. Estas partilham características importantes: são não-derramáveis, adequadas para ciclos profundos, podem ser montadas em qualquer posição, apresentam baixa auto-descarga e são seguras para uso em áreas com ventilação limitada, além de não necessitarem de manuseamento especial (Kitaronka 2022).

Baterias de Gel

Nestas baterias, o ácido sulfúrico é misturado com sílica, formando uma pasta espessa. Durante a secagem, formam-se microfissuras que permitem a recombinação de gases entre as placas positivas e negativas. Este processo pode resultar na libertação inicial de hidrogénio e oxigénio através da válvula de segurança em baterias novas. As baterias de gel podem ser fabricadas com placas positivas planas ou tubulares e oferecem melhor condução térmica das placas para as paredes da célula, resultando em melhor dissipação do calor em caso de sobrecarga (Kitaronka 2022).

Baterias *AGM* (Absorbed Glass Mat)

Estas baterias utilizam mantas de fibra de vidro tipo esponja especialmente projetadas para absorver todo o eletrólito entre as placas. Como contêm apenas o líquido necessário para manter a manta saturada, não há risco de derrame mesmo em caso de rutura (Kitaronka 2022). Uma vez que os gases são reabsorvidos nas mantas, as baterias *AGM* podem ser seladas e, por isso, não é necessária manutenção (Warner 2015).

Conforme indica Warner 2015, apesar da antiguidade das tradicionais baterias de chumbo-ácido (150+ anos), esta tecnologia é readaptada e aplicada, através das baterias *AGM*, nas soluções de eletrificação mais recentes, como μ HV tipo start/stop e MHV.

3.5.2 Bateria de Iões de Lítio - *Li-ion*

Desde a comercialização da primeira bateria de íões de lítio pela Sony há cerca de trinta anos, esta tecnologia revolucionou o mercado de baterias e possibilitou o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos portáteis e ferramentas elétricas, sendo utilizada em larga escala também nos veículos (Wulandari et al. 2023). A bateria de íões de lítio (*Li-ion*) é, segundo Amer et al. 2024, a bateria mais utilizada na tração de veículos eletrificados devido à sua «elevada densidade energética, elevada densidade de potência e longa duração. Além disso, é [considerada] amiga do ambiente, leve e tem uma longa esperança de vida», levando a que os veículos que equipem esta tecnologia «possam percorrer longas distâncias com um único carregamento, uma vez que possuem uma elevada capacidade de armazenamento de energia»; o tempo de carregamento das baterias de íões de lítio é também relativamente rápido quando comparado com outros tipos de baterias (Amer et al. 2024; Wulandari et al. 2023).

De acordo com Wulandari et al. 2023, o funcionamento das baterias de íões de lítio baseia-se em reações eletroquímicas reversíveis que permitem a troca de íões entre o ânodo e o cátodo durante os ciclos de carga e descarga. Segundo os autores, os principais componentes incluem o ânodo, frequentemente feito de grafite, e o cátodo, que pode ser composto por diversos materiais. O eletrólito é responsável pela condução dos íões entre os eletrodos, enquanto o separador evita o contacto direto entre eles. Wulandari et al. 2023 referem também que, apesar das suas vantagens, esta tecnologia enfrenta desafios significativos relacionados com o envelhecimento, degradação do material ativo e algumas questões de segurança. Ademais, a longevidade das baterias é influenciada por variados fatores entre os quais a temperatura e a profundidade de descarga (DoD).

Devido à utilização em larga escala das baterias *Li-ion*, foram criadas pelos fabricantes várias variantes desta tecnologia com alteração do material do ânodo, do cátodo e do tipo do eletrólito:

- **Variantes do Ânodo:**

O ânodo tradicional é feito de grafite, que tem sido amplamente utilizado devido à sua estabilidade e capacidade de intercalação de lítio. No entanto, a investigação está focada no desenvolvimento de novos materiais para o ânodo com maior capacidade (Wulandari et al. 2023). Estes incluem:

- Silício, que oferece uma capacidade teórica muito superior à da grafite, mas enfrenta desafios relacionados com a expansão volumétrica durante a carga (Wulandari et al. 2023).
- Lítio metálico que proporciona a maior capacidade teórica, mas apresenta problemas de segurança devido à formação de dendrites (Wulandari et al. 2023).
- Materiais de conversão, tais como óxidos metálicos, que podem oferecer capacidades mais elevadas através de reações de conversão (Wulandari et al. 2023).

- **Variantes do Cátodo:**

Os materiais do cátodo têm um impacto significativo no desempenho global da bateria. As principais variantes incluem:

- Óxidos de lítio e metais de transição: o $LiCoO_2$ (*LCO*) foi o primeiro material de cátodo comercializado e ainda é amplamente utilizado. Outras variantes incluem $LiNiO_2$ e $LiMnO_2$ (Wulandari et al. 2023).

- Fosfatos de lítio e metais: o $LiFePO_4$ (*LFP*) é conhecido pela sua estabilidade térmica e segurança, embora tenha uma densidade energética menor (Wulandari et al. 2023).
- Manganês: o $LiMn_2O_4$ oferece boa estabilidade e custo reduzido, mas sofre de dissolução de manganês durante o ciclo (Wulandari et al. 2023).
- Materiais de alto níquel: o $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$ (*NCM811*) oferece alta densidade energética, mas enfrenta desafios de estabilidade (Wulandari et al. 2023). O *NCM811* é, segundo Li et al. 2019, um dos mais promissores materiais para cátodos em baterias *Li-ion*, tendo uma grande vantagem em elevada densidade energética.

● **Variantes do Tipo de Eletrólito:**

O eletrólito desempenha um papel crucial na condução de iões e na formação da interface sólido-eletrólito (SEI). As principais variantes incluem:

- Eletrólitos líquidos não aquosos, geralmente baseados em carbonatos orgânicos com sais de lítio dissolvidos, como o $LiPF_6$ (Wulandari et al. 2023).
- Eletrólitos poliméricos (*Li-Po* - ver secção 3.5.2), que oferecem melhor segurança e flexibilidade, mas geralmente têm menor condutividade iónica à temperatura ambiente (Wulandari et al. 2023).
- Eletrólitos sólidos, sendo esta uma variante em desenvolvimento. Prometem maior segurança e densidade energética, mas enfrentam desafios de interface e condutividade (Wulandari et al. 2023).

Tal como referido por Amer et al. 2024, «todos os tipos de baterias de iões de lítio são geralmente respeitadores do ambiente». Atualmente, segundo os autores, de entre todas as tecnologias presentes no mercado, «as baterias de iões de lítio são consideradas as mais promissoras para os veículos elétricos, devido à sua elevada densidade energética e ao seu longo ciclo de vida». No passado, de acordo com os mesmos autores, o principal desafio das baterias *Li-ion* era o facto de não poderem funcionar a determinadas temperaturas, uma vez que isso afetava o desempenho da bateria, sendo este um problema já ultrapassado.

Além das qualidades já referidas, as baterias de iões de lítio destacam-se ainda por possuírem um excelente desempenho a baixas temperaturas, baixa capacidade de auto-descarga e simplicidade dos métodos de carregamento, o que as torna na opção preferida para a utilização comercial em veículos eletrificados (Amer et al. 2024).

As Variantes Mais Comuns das Baterias de Iões de Lítio por Alteração do Ânodo/Cátodo

Como exposto nos pontos acima, variando quimicamente o ânodo ou o cátodo, é possível conseguir várias variantes das tradicionais baterias de iões de lítio. Neste sentido, o termo *Li-ion* engloba uma grande variedade de químicas diferentes que, na realidade, se traduz em desempenho e características bem diferentes (Warner 2015).

A maior quantidade de variantes das baterias *Li-ion* é dada pela alteração do **ânodo**. De entre as químicas mais utilizadas destacam-se:

● **LFP - Fosfato de Ferro e Lítio ($LiFePO_4$)**

O *LFP* é uma das químicas de *Li-ion* mais presente no mercado automóvel, dada a

sua boa relação custo/potência. Com a sua elevada capacidade de fornecer potência, o cátodo *LFP* permite fornecer uma descarga de aceleração rapidamente após a carga por travagem regenerativa. A segurança é outra das mais-valias desta tecnologia: apesar de todas as químicas *Li-ion* terem modos de falha semelhantes, o *LFP* é mais tolerante a condições termicamente abusivas devido à sua menor densidade energética (tem menos energia para descarregar em caso de falha) (Warner 2015).

- **LMO - Manganês de Lítio** ($LiMn_2O_4$)

O cátodo de *LMO* torna esta química conveniente para a utilização em aparelhos portáteis, oferecendo amplas quantidades de energia e potência. Contudo, a sua aplicação em veículos não tem expressão atualmente, devido ao seu curto ciclo de vida (Warner 2015).

- **LCO - Cobalto de Lítio** ($LiCoO_2$)

À semelhança do *LMO*, o *LCO* tem aplicação essencialmente em dispositivos portáteis. A sua não utilização em grandes formatos deve-se, neste caso, à maior instabilidade térmica e reatividade quando comparado com outras químicas - o fenómeno de *thermal runaway* ocorre aos 130 °C (Warner 2015).

- **NCA - Níquel-Cobalto-Alumínio** ($LiNiCoAlO_2$)

Tal como as duas químicas anteriores, o cátodo de *NCA* também tem emprego frequente em aplicações de energia portáteis. No entanto, a sua potência característica permitem a sua utilização em veículos, apesar do seu custo algo elevado e da baixa segurança comparativamente com outras variantes (Warner 2015).

- **NMC² - Níquel-Manganês-Cobalto** ($LiNiMnCoO_2$)

Com o aumento massivo da produção de veículos eletrificados, o cátodo de *NMC* tem ganho grande relevância, quer pela sua maior densidade energética (uma das maiores da atualidade), quer pela tensão por célula também maior. Além disso, o seu custo é competitivo (Warner 2015).

Relativamente ao **cátodo**, como previamente referido, a escolha recai tendencialmente pelo carbono (sobretudo na forma de grafite, mas também em carbono macio ou duro). No entanto, de entre os novos estudos que têm surgido, destaca-se uma química com base de *Li-ion*:

- **LTO - Titanato de Lítio** ($Li_4Ti_5O_{12}$)

A células com este cátodo conseguem operar eficazmente a muito baixas temperaturas, fornecendo uma potência considerável. Por outro lado, a tensão nominal por célula oferecida pelo *LTO* é bastante inferior em comparação com as químicas mais comuns. Além disso, as células desta química tendem a ter um custo significativamente superior às células de *NMC* ou *LFP* equivalentes, ou seja, para além de serem necessárias mais células para alcançar a tensão desejada para uma bateria, o custo final também será superior (Warner 2015).

Na Tabela 3.3 estão caracterizadas as variantes descritas acima e que, segundo Warner 2015, são as variantes químicas de íões de lítio mais comumente utilizadas. Tal como menciona o autor, os fabricantes chegam a combinar estas e outras químicas num único design de bateria para alcançar os diferentes benefícios de cada tecnologia.

²se houver uma percentagem mais elevada de cobalto do que manganês na química passa a ser referido como *NCM* (Níquel-Cobalto-Manganês)

Tabela 3.3: Caracterização das Variantes das Baterias Li-ion por Alteração do Ânodo/Cátodo
Adaptado de: Warner 2015

	LFP	LMO	Ânodo LCO	NCA	NMC	Cátodo LTO
Energia Específica (Wh/kg)	80-130	105-120	120-150	80-220	140-180	70
Densidade Energética (Wh/L)	220-250	250-265	250-450	210-600	325	130
Potência Específica (W/kg)	4500	1000	600	1500-1900	500-3000	750
Tensão (V/célula)	3.2-3.3	3.8	3.6-3.8	3.6	3.6-3.7	2.2-2.3
Nº de Ciclos	1000-2000	>500	>700	>1000	1000-4000	>4000
Auto-Descarga (%/mês)	<1 %	5 %	1-5 %	2-10 %	1 %	2-10 %
Custo (\$/kWh)	400-1200	400-900	250-450	600-1000	500-900	600-2000
Temperatura de Operação (°C)	-20 a +60	-20 a +60	-20 a +60	-20 a +60	-20 a +55	-40 a +55

Bateria de Polímero de Iões de Lítio ou Lítio-Polímero - $Li - Po$

Conforme apresentam Amer et al. 2024, além das baterias de iões de lítio ($Li - ion$), estão disponíveis as baterias de lítio-polímero ($Li - Po$). «Uma bateria $Li - Po$ é composta por um ânodo de lítio metálico, um eletrólito condutor de iões de lítio (que também funciona como separador) e um cátodo de inserção de lítio», sendo que «os eletrólitos poliméricos mais eficazes são criados dissolvendo sal de lítio em poliésteres modificados» (Amer et al. 2024). De acordo com os autores, os eletrólitos sólidos poliméricos permitem que as baterias assumam diferentes formas e tamanhos, o que não é possível com o eletrólito líquido ou em gel. Ademais, as baterias $Li - Po$ oferecem maior densidade energética, maior segurança e menor peso, quando comparadas com as baterias $Li - ion$. Os autores referem também que esta tecnologia tem aplicação frequente em pequenos veículos elétricos, onde o espaço é limitado.

No entanto, entre as desvantagens associadas às baterias $Li - Po$ em VEs estão a autonomia limitada, a gestão térmica complexa aliada a outras preocupações de segurança, elevados custos, disponibilidade limitada, a reatividade interna do ânodo com os componentes do eletrólito polimérico e a baixa condutividade do eletrólito à temperatura ambiente (Amer et al. 2024).

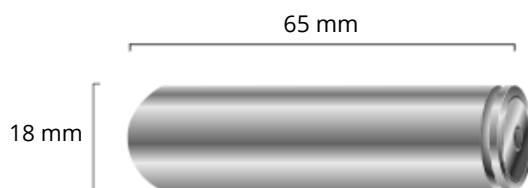


Figura 3.5: Célula de Bateria 18650 (também conhecidas por 1865). Como ilustrado, a nomenclatura 18650 significa que a célula tem 18 mm de diâmetro por 65 mm de comprimento.

Adaptado de: commons.wikimedia.org/Tesla_4680_2170_18650

Formatos das Baterias de Iões de Lítio

As células das baterias *Li – ion* são apresentadas essencialmente em três formatos: células cilíndricas, células prismáticas e células em bolsa.

Conforme relata Warner 2015, o formato mais produzido são as células cilíndricas da série 18650 (Figura 3.5), com cerca de 660M de células produzidas anualmente (dados de 2013, pela TrendForce). Segundo o autor, no setor automóvel, a maioria das marcas e fabricantes de baterias opta atualmente por células prismáticas ou em bolsa — estas últimas, especialmente no caso das baterias *Li – Po* —, sem descuidar, no entanto, o conhecido interesse da Tesla pelas células cilíndricas, das séries 18650, 2170 e, mais recentemente, 4680.

Warner 2015 justifica que a preferência pelas células prismáticas e em bolsa deve-se, em grande medida, pela menor quantidade de células necessárias para atingir os níveis desejados de tensão e capacidade energética. Este fator tem implicações diretas em termos de fiabilidade: ao utilizar células de maiores dimensões, reduz-se significativamente o número de ligações elétricas no sistema, o que implica menos pontos potenciais de falha; por outro lado, conjuntos compostos por milhares de pequenas células (como as cilíndricas 18650) apresentam um número muito superior de interligações, elevando o risco de falhas ao nível do sistema.

O autor argumenta ainda que, do ponto de vista dos fabricantes OEM³, este aspeto é particularmente crítico, pois um maior número de ligações corresponde a um aumento do risco de avarias e, conseqüentemente, aos custos associados a garantias. A análise sob a ótica da qualidade evidencia esta diferença: um sistema com mais de 7000 células, como o utilizado no Tesla Model S, com baterias cilíndricas 18650 da Panasonic, implica mais de 14.000 pontos de soldadura. Por comparação, o pack do Chevrolet Volt requer apenas 576 soldaduras para as suas 288 células do tipo bolsa. Já o Nissan Leaf, também com células em bolsa, utiliza apenas 192 células para formar 24 kWh de capacidade (Tabela 3.4). Contudo, as comparações não são tão lineares quanto aparentam: veículos de diferentes tipologias, com diferentes químicas de célula tem diferentes necessidades.

As **células cilíndricas** (Figura 3.6A) destacam-se pela robustez da sua embalagem metálica (aço ou alumínio), que oferece elevada resistência mecânica e boa estabilidade estrutural. Conforme indica Warner 2015, há uma ampla disponibilidade de soluções de fabrico para este formato, o que o torna amplamente utilizado. No entanto, apresentam maior impedância inicial, gerando mais calor durante o uso, sendo geralmente arrefecidas por ar – um método pouco eficiente. A pequena dimensão facilita, no entanto, a gestão térmica. Um dos

³Fabricantes de Equipamento Original, do inglês, *Original Equipment Manufacturer*

Tabela 3.4: Ligações dos packs de bateria de diferentes modelos eletrificados (Warner 2015)

Modelo	Tipologia	Capacidade da Bateria	Células e Ligações
Tesla Model S (2012-15)	BEV	85 kWh	7000+ células cilíndricas 14000+ ligações
Chevrolet Volt/ Opel Ampera (2011-16)	EV-REx	16 kWh	288 células em bolsa 576 ligações
Nissan Leaf (2011-18)	BEV	24 kWh	192 células em bolsa 384 ligações

desafios técnicos associados a este formato está na selagem da tampa, que é frequentemente realizada por *crimpagem*⁴. Este processo, quando não adequadamente controlado, pode introduzir partículas metálicas no interior da célula, com risco de curto-circuito. Um exemplo notável foi o caso da Sony em 2006, em que uma falha no controlo de qualidade durante a crimpagem levou à libertação de partículas de níquel no interior das células. Essas partículas causaram curtos-circuitos internos, resultando em sobre-aquecimento, incêndios e explosões em baterias usadas em computadores portáteis. A Sony foi obrigada a realizar uma chamada à fábrica de milhões de unidades, com um custo superior a 250 milhões de dólares, e o incidente levou à revisão de normas e práticas de fabrico em toda a indústria (Ham, Hong e Cameron 2012; U.S. Consumer Product Safety Commission 2006; Warner 2015).

Por outro lado, as **células prismáticas** (Figura 3.6B) apresentam um formato retangular (em prisma) com invólucro rígido (alumínio, aço ou plástico), amplamente adotadas pela indústria automóvel, especialmente após a normalização de tamanhos proposta pela VDA⁵. Apresentam elevada capacidade individual e requerem menos interligações no pack, o que, em teoria, melhora a fiabilidade; a integração é mais eficiente e requer menos componentes estruturais (Warner 2015).

Por fim, as **células em bolsa** (Figura 3.6C) - formato utilizado atualmente nas células de *Li - Po* - utilizam invólucro flexível laminado e são comuns em eletrónica portátil devido à sua leveza e espessura reduzida. Segundo o mesmo autor, a versatilidade dimensional deste formato, também denominado de *pouch*, facilita o design de soluções personalizadas. No entanto, são mais frágeis, exigem cuidados de montagem e uma aplicação controlada de pressão para manter o desempenho ao longo do tempo. A dificuldade em integrar dispositivos de segurança como CIDs⁶ e PTCs⁷ e a vulnerabilidade ao revestimento de lítio (*white out*) são desvantagens a considerar, especialmente em aplicações exigentes (Warner 2015).

⁴Processo de fixação mecânica em que a tampa da célula é comprimida contra o corpo metálico da embalagem, selando-a sem recurso a soldadura. Este método é comum em células cilíndricas e pode apresentar riscos de contaminação interna se houver libertação de partículas metálicas.

⁵*Verband der Automobilindustrie*: Associação da indústria automóvel alemã, responsável por propor normas técnicas para componentes, incluindo baterias.

⁶*Current Interrupt Device*: Dispositivo de segurança que interrompe o circuito elétrico quando a pressão interna da célula ultrapassa um limite seguro.

⁷*Positive Temperature Coefficient*: Dispositivo que limita a corrente elétrica em caso de aquecimento excessivo, funcionando como proteção térmica.

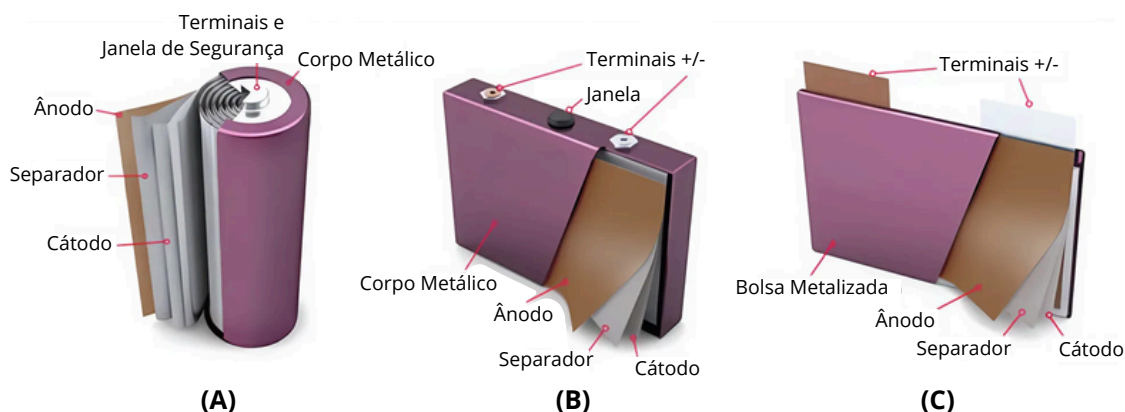


Figura 3.6: Formatos das Baterias $Li - ion$ - (A) Cilíndrica, (B) Prismática e (C) em Bolsa.

Adaptado de: LaBatteria

De forma simplificada, a construção de um pack de baterias de tração realiza-se através da agregação sequencial de células individuais em módulos, os quais são depois integrados para formar o pack final. Na Figura 3.7, é ilustrado este processo, com destaque para a utilização de células em formato bolsa, como é o caso do Kia Soul EV (1ª Geração), onde esta tecnologia foi empregue. As principais características dos formatos apresentados estão reunidas na Tabela 3.5.

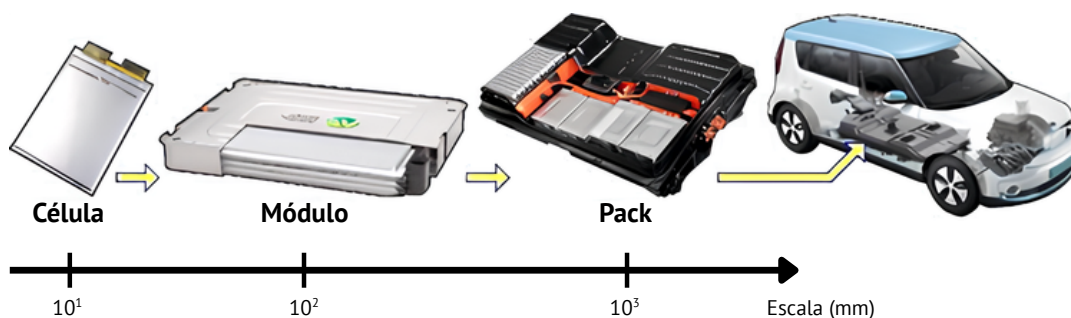


Figura 3.7: Etapas de montagem de um pack de baterias típico de um VE, a partir da célula até à integração no veículo. O exemplo corresponde ao Kia Soul EV (1.ª Geração), que montava células do tipo bolsa de $Li - Po$.

Adaptado de: Vidyanandan 2019 e Deng et al. 2020

3.5.3 Bateria de Níquel-Cádmio - $Ni - Cd$

As baterias de níquel-cádmio ($Ni - Cd$) são apresentadas por Amer et al. 2024 como uma das mais antigas pilhas recarregáveis atualmente utilizadas, remontando aos séculos XIX e XX. Relativamente à sua construção, os autores apontam que as baterias de $Ni - Cd$ tem dois principais componentes: o óxido-hidróxido de níquel(III), que serve de elétrodo positivo, e o cádmio, que serve de elétrodo negativo; como eletrólito, é utilizado o hidróxido de potássio (eletrólito alcalino), e a pilha é envolvida por um invólucro metálico. O hidróxido de potássio é também utilizado, em solução aquosa, para dissolver os elétrodos positivos de níquel sintetizado e os elétrodos negativos de cádmio aquando da preparação destas baterias (Amer et al. 2024).

Tabela 3.5: Quadro-resumo comparativo dos diferentes formatos de células de íões de lítio (Warner 2015).

	Cilíndrica	Prismática	Bolsa
Invólucro	Aço/alumínio rígido	Alumínio, aço ou plástico rígido	Laminado flexível (polímero)
Resistência Mecânica	Muito elevada	Elevada	Baixa (sensível ao manuseamento)
Capacidade Individual	Baixa a média	Alta	Variável (até ~100 Ah)
Densidade Energética	Média	Alta	Alta
Impedância Inicial	Alta (mais calor)	Média	Baixa
Constituição de Pack	Requer muitas ligações	Menos ligações (mais simples)	Flexível (exige pressão uniforme)
Arrefecimento	Ar (pouco eficiente)	Líquido ou ar	Requer cuidados com dissipação térmica
Durabilidade Esperada	Alta (se bem arrefecida)	Alta	Boa, com pressão controlada

No que ao campo de aplicação diz respeito, as baterias de $Ni - Cd$ têm sido amplamente utilizadas em variadas vertentes, incluindo a mobilidade eletrificada, devido ao seu elevado desempenho. Segundo os autores, as baterias de $Ni - Cd$ são conhecidas pela sua elevada densidade energética e longa duração do ciclo, tendo uma relação potência/peso muito elevada, o que, aliada à baixa necessidade de manutenção, as torna adequadas para alimentar veículos elétricos. Além disso, as «excelentes capacidades de ciclo profundo» características destas baterias permitem a recarrega destas várias vezes sem perda significativa de capacidade. Além disso, são concebidas para um carregamento rápido e podem ser carregadas a rácios C (C -rate) elevados sem gerar calor excessivo. De facto, as baterias de $Ni - Cd$ são as únicas capazes de carregar extremamente depressa e com o mínimo de esforço, sendo que as células concebidas para um carregamento ultra-rápido podem ser carregadas até 70 % em poucos minutos (Amer et al. 2024).

Apesar de também serem «altamente robustas, o que as torna menos suscetíveis a uso abusivo» e da capacidade de se descarregarem profundamente durante longos períodos de tempo, existem preocupações ambientais e uma capacidade energética limitada que, com o tempo, levaram os fabricantes a preferir químicas alternativas para as suas baterias (Amer et al. 2024).

3.5.4 Bateria de Hidreto Metálico de Níquel - $Ni - MH$

Uma bateria de hidreto de metálico de níquel, também designada por bateria níquel-metal-hidreto ($Ni - MH$), onde, de acordo com Amer et al. 2024, um elétrodo de hidróxido de níquel ($NiOOH$) é utilizado como positivo à semelhança do elétrodo positivo nas baterias de $Ni - Cd$. Contrariamente, o elétrodo negativo não é constituído por cádmio, mas sim por uma liga de armazenamento de hidrogénio. Devido a esta construção, a capacidade e a

densidade energética de uma bateria de $Ni - MH$ podem exceder em pelo menos duas vezes as de uma bateria de $Ni - Cd$ de igual dimensão (Amer et al. 2024).

As baterias de $Ni - MH$ também podem exceder os 1.000 ciclos. Além disso, «oferecem uma gama aceitável de temperaturas de funcionamento/armazenamento e uma maior densidade energética», levando a uma maior vida útil. Ademais, esta tecnologia é capaz de suportar temperaturas extremas e é conhecida pela sua durabilidade, tendo também, no entanto, tendência a ser baterias mais volumosas e pesadas que as $Li - ion$ (Amer et al. 2024).

Segundo os mesmos autores, o desenvolvimento de um sistema com baterias $Ni - MH$ exige algumas considerações particulares, tais como:

- **Materiais para desenvolvimento:** As superfícies exteriores das baterias de $Ni - MH$ são normalmente de aço niquelado, o que as torna resistentes.
- **Temperatura:** A temperatura ambiente é a mais adequada para o funcionamento das baterias de $Ni - MH$. No entanto, quando expostas a uma gama muito mais alargada de temperaturas, continuam a ser viáveis se devidamente projetadas.
- **Choque e vibração:** As baterias de $Ni - MH$ são também adequadas para dispositivos portáteis e compactos devido à capacidade de suportarem choques e vibrações típicos sem sofrerem efeitos negativos no seu desempenho devido ao manuseamento e movimento mais frequentes.

De referir também que as baterias de $Ni - MH$ foram abundantemente utilizadas pelas primeiras gerações de veículos eletrificados deste século (Amer et al. 2024).

3.5.5 Bateria de Zinco-Bromo - $Zn - Br_2$

As baterias de zinco-bromo ($Zn - Br_2$) possuem uma ampla gama de aplicações, apesar de não ser uma tecnologia dominada no setor automóvel - a sua presença reduz-se a apenas protótipos e projetos. Amer et al. 2024 apresentam que cada célula de uma bateria de $Zn - Br_2$ é «composta por dois compartimentos separados por uma membrana microporosa de poliolefina, através da qual fluem dois eletrólitos distintos [solução aquosa de zinco-bromo]. Tipicamente, os eletrodos são feitos de materiais à base de carbono com elevada área de superfície». Os autores adiantam ainda que a separação dos eletrodos é realizada por uma «folha de plástico microporosa ou uma membrana iónica». Nas membranas iónicas são transportado iões de bromo e zinco, enquanto são excluídos iões de polibromo, bromo aquoso e fases complexas. Assim sendo, quando o bromo é descarregado no cátodo positivo, transforma-se em iões brometo, revertendo-se o processo durante o carregamento. O desenvolvimento de bromo é minimizado durante esses processos com o uso de agentes complexantes, uma vez que o bromo induz um perigo significativo para a saúde (Amer et al. 2024).

Pelos autores referidos acima são também apresentadas diversas vantagens das baterias de $Zn - Br_2$, incluindo excelente gestão térmica, elevada energia específica e eficiência energética, baixos custos de produção, assim como impacto ambiental reduzido. Proporcionam ainda «flexibilidade no design, operação a temperaturas ambiente, elevada densidade de potência, carregamento rápido, insensibilidade a descargas de 100 %, e disponibilidade de materiais». Ainda não foram desenvolvidas baterias comerciais, apesar de as baterias $Zn - Br_2$ terem sido patenteadas há mais de um século, devido a duas propriedades inerentes do zinco: a tendência de formação de dendrites durante o depósito e o elevado volume de bromo nos eletrólitos contendo brometo de zinco. Ademais, a alta volatilidade do bromo

permite a sua difusão e reação diretamente com os elétrodos de zinco, especialmente quando depósitos dendríticos de zinco provocam curto-circuito na célula, o que resulta no fenômeno indesejado de auto-descarga (Amer et al. 2024).

Além das características acima mencionadas, estas baterias apresentam ainda outros desafios, incluindo a necessidade de sistemas auxiliares para regular a circulação e a temperatura. Adicionalmente, observa-se um alto nível de auto-descarga quando a bateria é desligada durante o carregamento, e capacidades de potência moderadas que necessitam de melhorias. Por outro lado, as baterias $Zn-Br_2$ são seguras e fáceis de manusear, devido à estabilidade relativa em eletrólitos aquosos (Amer et al. 2024).

3.5.6 Bateria de Cloreto de Níquel e Sódio (ZEBRA) - $Na - NiCl$

Uma bateria $Na-NiCl$, também conhecida como bateria ZEBRA⁸, contém, segundo Amer et al. 2024, um cátodo de hidreto metálico de níquel ($Ni - MH$) e um ânodo de carbono. Inicialmente, estas baterias «foram projetadas para substituir as baterias alcalinas tradicionais em dispositivos eletrônicos», e tornaram-se populares devido às suas qualidades de densidade energética e desempenho consideráveis. Com a evolução, as baterias ZEBRA também tiveram utilização em VEs, onde, apesar de serem fiáveis e oferecerem um bom desempenho, também «apresentam várias desvantagens, incluindo a curta vida útil, o elevado custo, o impacto ambiental, a dependência de combustíveis fósseis e a disponibilidade limitada destes produtos» (Amer et al. 2024).

Como retratado pelos autores, as baterias ZEBRA tem um funcionamento similar às baterias de sódio-enxofre ($Na - S$), sendo que, na sua montagem, o cloreto de níquel ($NiCl_2$) atua como o eletrodo positivo, o sódio líquido como o eletrodo negativo, e um eletrólito cerâmico serve como separador entre os elétrodos.

Tal como referem Amer et al. 2024, as baterias ZEBRA têm a vantagem de possuir um tempo de recarga é geralmente mais curto quando comparado com outros tipos de baterias, como as baterias de $Li - ion$. «As baterias ZEBRA também são conhecidas pela sua baixa taxa de auto-descarga, permitindo que permaneçam carregadas por períodos prolongados. [...] Além disso, as baterias ZEBRA são percebidas como mais ecológicas do que as baterias convencionais.» Os materiais utilizados na sua construção, são recicláveis o que torna o seu ciclo de vida menos prejudicial ao meio ambiente (Amer et al. 2024).

3.5.7 Bateria de Sódio-Enxofre - $Na - S$

«As baterias de sódio-enxofre ($Na - S$) geralmente consistem em um eletrodo positivo, um eletrodo negativo, um eletrólito, um separador e uma estrutura de encapsulamento» (Amer et al. 2024). Quimicamente, segundo os autores, «o eletrodo positivo é composto por enxofre líquido e sal fundido de polissulfeto de sódio, enquanto o eletrodo negativo consiste em sódio metálico fundido. O cátodo e o ânodo são formados, respetivamente, por enxofre fundido e sódio» e é utilizado um eletrólito sólido cerâmico em alumina de sódio.

Durante a descarga, os átomos de sódio libertam um eletrão (transformam-se em iões). Para alcançar o terminal positivo, os eletrões devem passar por circuitos externos. Na presença de enxofre fundido, esses eletrões são convertidos em polissulfetos, sendo o fluxo de energia equilibrado pelos iões de sódio que atingem o eletrodo positivo; no ciclo de carregamento, o processo é inverso (Amer et al. 2024).

⁸do inglês *Zero Emission Battery Research Activity*

No que às suas características de funcionamento diz respeito, Amer et al. 2024 referem que as baterias $Na - S$ apresentam baixo desempenho à temperatura ambiente e os ciclos rápidos causam danos críticos. De acordo com os autores, a causa deste fraco desempenho das baterias $Na-S$ é atribuída ao efeito *shuttle*⁹, que é intensificado nessas baterias. Como resultado, há uma redução na eficiência e um aumento das perdas durante o seu ciclo de operação.

Apesar disto, de forma geral, as baterias $Na - S$ apresentam um potencial significativo no desenvolvimento de veículos elétricos, oferecendo uma alternativa promissora a outras tecnologias de baterias devido à sua elevada densidade energética, longa vida útil e custo-benefício (Amer et al. 2024).

3.5.8 Bateria de Estado Sólido

Tal como refere Amer et al. 2024, «as baterias de estado sólido, consistem em um eletrodo positivo, um eletrólito e um eletrodo negativo, tal como qualquer outro dispositivo eletroquímico». Nesta tecnologia, a principal característica diferenciadora consiste na utilização de eletrólitos sólidos em vez de líquidos ou em gel e por isso estado do eletrólito é denominado "estado sólido", sendo normalmente cristalino ou amorfo.

Segundo os autores, as baterias de estado sólido são uma tecnologia emergente com potencial substancial para o futuro dos veículos elétricos de longa autonomia, uma vez que possuem várias vantagens sobre as baterias convencionais, incluindo maior densidade energética, tempos de carregamento mais rápidos e maior segurança. Além disso, são ecológicas e têm maior durabilidade.

Os autores indicam que uma bateria de estado sólido apresenta ânodos em metal de lítio e cátodos compostos por óxidos em camadas combinados com eletrólitos sólidos, como sólidos inorgânicos ou polímeros sólidos. Dentro das variantes existentes, as baterias de lítio-enxofre ($Li - S$) e de lítio-oxigênio ($Li - O_2$) estão entre as mais promissoras, apesar dos vários problemas associados a esta tecnologia que ainda existem, incluindo inflamabilidade e a instabilidade cíclica (Amer et al. 2024).

3.5.9 Comparação das diferentes tecnologias

Toda e qualquer bateria deve funcionar dentro de uma gama de temperaturas e tensões que garanta a segurança e a fiabilidade. Se estes limites forem ultrapassados, o desempenho da bateria diminui rapidamente e pode mesmo constituir um risco de segurança (Amer et al. 2024).

As comparações de baterias devem ter em conta a temperatura de funcionamento dos vários tipos, uma vez que esta pode afetar a sua aplicação. No que diz respeito às temperaturas de funcionamento, as baterias de $Pb - PbO_2$, íões de lítio, $Li - Po$ e de estado sólido são as melhores opções, porque são capazes de funcionar numa gama adequada para a maioria das aplicações em veículos. No entanto, as baixas temperaturas de operação podem afetar negativamente a capacidade das baterias de íões de lítio e resultar em auto-descarga (ver Tabela 3.7) (Amer et al. 2024).

⁹O efeito *shuttle* em baterias de sódio-enxofre refere-se à migração de polissulfetos entre os eletrodos durante a carga e descarga, resultando em perda de capacidade e eficiência. Isso ocorre quando os polissulfetos se dissolvem no eletrólito e se movem entre os eletrodos, levando à auto-descarga.

Em termos de densidade energética, as baterias *Li – ion* e as baterias de estado sólido são particularmente notáveis. «Devido à utilização de lítio metálico para o cátodo e de óxidos ou sulfuretos para o ânodo, as baterias de estado sólido são capazes de atingir uma elevada densidade energética». No outro prato da balança, as baterias de estado sólido têm um desempenho fraco em termos de energia e potência específicas, quando comparadas *Ni – MH* e de íões de lítio. Apesar disso, as baterias de estado sólido são capazes de produzir uma quantidade considerável de energia e potência específicas devido à sua elevada densidade energética muito superior (ver Tabela 3.8) (Amer et al. 2024).

Por fim, se a duração da bateria for tida em conta, parece que as baterias de *Ni – MH*, *Li – Po* e chumbo-ácido (*Pb – PbO₂*) têm o pior desempenho. Ainda neste campo, as baterias de estado sólido oferecem o melhor desempenho devido à sua capacidade de suportar mais de 10 000 ciclos. Além disso, as baterias de estado sólido têm também a menor taxa de auto-descarga numa base mensal (ver Tabela 3.9) (Amer et al. 2024).

Tendo em conta todos os fatores anteriormente referidos, a tecnologia de íões de lítio é atualmente utilizada em força nos veículos eletrificados. Tal é justificado pelos desempenhos equilibrados em todos os parâmetros analisados e referidos nas Tabelas 3.7 a 3.9.

Tabela 3.7: Resistência Interna e Temperatura de Operação de diferentes tecnologias de baterias.

Adaptado de: Amer et al. 2024

	Resistência Interna (mΩ)	Temperatura de Operação (°C)
<i>Pb – PbO₂</i>	≤ 100	–20 a 45
<i>Li – ion</i>	20 – 25	–20 a 60
<i>Ni – Cd</i>	100 – 200	0 a 50
<i>Ni – MH</i>	200 – 300	0 a 50
<i>Zn – Br₂</i>	≥ 500	20 a 40
<i>Na – NiCl</i>	150 – 200	300 a 350
<i>Na – S</i>	15 – 20	300 a 350
<i>Li – Po</i>	≤ 10	–20 a 60
Estado Sólido*	≤ 5	–50 a 100

* Valores Estimados (tecnologia em desenvolvimento)

Tabela 3.8: Densidade Energética, Energia e Potência Específica de diferentes tecnologias de baterias.

Adaptado de: Amer et al. 2024

	Densidade Energética (Wh/L)	Energia Específica (Wh/kg)	Potência Específica (W/kg)
<i>Pb – PbO₂</i>	60 a 100	30 a 60	75 a 100
<i>Li – ion</i>	200 a 735	100 a 275	350 a 3000
<i>Ni – Cd</i>	600 a 150	60 a 80	120 a 150
<i>Ni – MH</i>	100 a 300	60 a 120	250 a 1000
<i>Zn – Br₂</i>	60 a 70	75 a 140	80 a 100
<i>Na – NiCl₂</i>	110 a 120	160	150 a 200
<i>Na – S</i>	120 a 130	130	150 a 290
<i>Li – Po</i>	185 a 220	100 a 160	250 a 430
Estado Sólido*	≥ 1000	≥ 260	≥ 500

* Valores Estimados (tecnologia em desenvolvimento)

Tabela 3.9: Ciclos de Vida Útil e Auto-Descarga Mensal de diferentes tecnologias de baterias.

Adaptado de: Amer et al. 2024

	Vida Útil em Número de Ciclos	Auto-Descarga (% por mês, em média)
<i>Pb – PbO₂</i>	500 a 800	18 %
<i>Li – ion</i>	400 a 3000	10 %
<i>Ni – Cd</i>	2000	10 %
<i>Ni – MH</i>	500 a 1000	18 %
<i>Zn – Br₂</i>	2000	≥ 80 %
<i>Na – NiCl</i>	1500 a 2000	≤ 2 %
<i>Na – S</i>	2500 a 4500	≤ 2 %
<i>Li – Po</i>	500	≤ 2 %
Estado Sólido*	≥ 10000	≤ 1 %

* Valores Estimados (tecnologia em desenvolvimento)

3.5.10 Exemplos de aplicação das diferentes tecnologias

Depois de listados as tecnologias mais comuns aplicadas à construção de baterias e apresentadas as suas características são apresentados, na Tabela 3.10 alguns exemplos práticos da aplicação das diferentes baterias referidas.

Seguem abaixo algumas notas complementares:

- Baterias de *Pb – PbO₂* (Chumbo-Ácido):
Estas baterias, mais volumosas, são comuns na alimentação dos sistemas SLI de todos os veículos e na tração de empilhadores elétricos (Linde, Jungheinrich, Toyota, entre outros), tal como ilustrado na Figura 3.8. A utilização das baterias de chumbo-ácido nestes casos é predileta devido à sua capacidade de fornecer altas correntes de arranque e à troca facilitada de módulos, algo importante devido à sua vida útil limitada. Esse tipo de bateria, apesar de ser mais pesado e volumoso, acaba por ser popular em aplicações de baixo custo.



Figura 3.8: Baterias de Chumbo num Emplihador Toyota.
Retirado de: <https://liftow.com/pages/forklift-batteries>

- Baterias de $Li - ion$ (Iões de Lítio):
É a tecnologia de baterias com maior aplicação em veículos de passageiros, uma vez que oferece uma alta densidade energética e uma longa vida útil, tornando-a ideal para uso nos veículos elétricos modernos.
 - Baterias $Li - Po$ (Polímero de Lítio):
As baterias $Li - Po$ são mais leves que as de $Li-ion$ e podem ser moldadas em formas mais flexíveis, o que as torna ideais para veículos compactos e motocicletas, devido à sua alta performance e peso reduzido.
- Baterias de $Ni - Cd$ (Níquel-Cádmio):
Embora sem aplicação atual, as baterias de $Ni - Cd$ foram usadas em veículos de séries limitadas no final do século XX e em unidades de teste antes da utilização das baterias de $Ni - MH$.
- Baterias de $Ni - MH$ (Níquel-Hidreto Metálico):
Usadas em híbridos mais antigos (no início dos anos 2000), as baterias de $Ni - MH$ oferecem uma boa combinação de custo, durabilidade e eficiência para veículos híbridos.
- Baterias $Zn - Br_2$ (Zinco-Bromo):
Tecnologia não disponível no mercado. Existem, no entanto, pesquisas em andamento, especialmente para aplicações de grande porte e longa autonomia.
- Baterias $ZEBRA$ ($Na - NiCl_2$ - Sódio-Níquel Cloreto):
A tecnologia $ZEBRA$ tem sido testada em veículos utilitários e comerciais.
- Baterias $Na - S$ (Sódio-Enxofre):
À semelhança de outras tecnologias, não tem aplicação atual, as tendo sido utilizadas em testes e séries limitadas de veículos de mercadorias e utilitários.
- Baterias de Estado Sólido ($Solid-State$):
Tecnologias de baterias de estado sólido são consideradas o futuro das baterias de tração, oferecendo vantagens em termos de segurança, duração da bateria e eficiência. Espera-se que a tecnologia esteja disponível comercialmente nos próximos anos, especialmente para veículos pesados e motocicletas de alta autonomia.

Tabela 3.10: Exemplos de veículos para diferentes tipos de baterias para tração, incluindo automóveis, motocicletas, veículos pesados e utilitários.

Tecnologia	Exemplos de Aplicação
$Pb - PbO_2$	<ul style="list-style-type: none"> - Linde E16 (empilhador) - Goupil G4 (veículo utilitário) - Fiat Panda Elettra - Renault Kangoo Electri'cité (versão inicial)
LFP	<ul style="list-style-type: none"> - Tesla Model 3 Long Range (2023) - MG4 Electric Standard - KGM Torres EVX - BYD Atto 3
LMO	<ul style="list-style-type: none"> - Mitsubishi i-MiEV/Citroën C-Zero/Peugeot iOn - Nissan Leaf (2011)
LTO	Apenas protótipos (s/ comercialização na UE)
LCO	<ul style="list-style-type: none"> - Tesla Roadster (2008)
$Li - ion$	<p>NCA</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tesla Model X - Tesla Model S - Harley-Davidson LiveWire (motociclo) <p>NMC</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kia EV3 - Mercedes-Benz EQS - Volkswagen Passat eHybrid - Audi A6 e-tron - Mercedes-Benz eActros (pesado de mercadorias) - Bolloré Bluecar (<i>carsharing em Paris</i>) - Kia Soul EV <p>$Li - Po$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Smart EQ ForTwo - Zero SR/F (motociclo)
$Ni - Cd$	<ul style="list-style-type: none"> - Peugeot 106 Electric/Citroën Saxo Electric - Renault Clio Electric - Vários modelos de teste antes das baterias de $Ni - MH$
$Ni - MH$	<ul style="list-style-type: none"> - Toyota Prius (1ª e 2ª geração) - Honda Insight (1ª geração) - Lexus RX 400h - Honda FCX Clarity (FCEV) - GM EV1 (2ª geração)
$Zn - Br_2$	<p>Apenas alguns protótipos e projetos no passado.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modec Electric Van (veículo de entregas)
$Na - NiCl_2$	<ul style="list-style-type: none"> - Iveco Daily Electric - Alke' ATX 340E (veículo utilitário, nas primeiras versões) - Think City (versões iniciais)
$Na - S$	Apenas protótipos como o Ford Ecostar (veículo de mercadorias)
Estado Sólido	Tecnologia em desenvolvimento, apenas protótipos como o BMW i Vision Circular e Toyota Solid-State Concept

3.6 Carregamento

De acordo com Amer et al. 2024, para alcançar o sucesso dos veículos elétricos é essencial possuir um método de carregamento rápido e fácil. A forma como as baterias são carregadas e descarregadas tem um impacto significativo na sua segurança, durabilidade e desempenho.

Para carregar uma bateria a partir da rede elétrica, são necessárias três etapas principais: duas elétricas e uma mecânica. A energia elétrica é distribuída, em Portugal e na maior parte da Europa, através da rede com uma tensão nominal (RMS) e uma frequência de 50 Hz (60 Hz nos Estados Unidos da América). Como as baterias são dispositivos de corrente contínua (DC) que funcionam com tensão variável baseada na sua tensão nominal, estado de carga (SoC) e taxa de carga/descarga, a primeira etapa elétrica, conhecida como retificação, converte a corrente alternada (AC) em corrente contínua (Amer et al. 2024).

A segunda etapa elétrica, conforme indicam os mesmos autores, ajusta a tensão de alimentação para permitir uma taxa de carga controlada, considerando as características de aceitação da carga da bateria, que incluem tensão, capacidade, eletroquímica e outros fatores. Um carregador básico combina estas duas etapas elétricas. A 3ª etapa - a etapa mecânica - consiste na ligação física do veículo (elétrico ou PHEV) à fonte de alimentação pelo utilizador.

Com o crescimento da procura por veículos eletrificados, está a ocorrer uma expansão global das estações de carregamento. Como consequência, as principais organizações normativas têm implementado regulamentos específicos para estas estações (Amer et al. 2024).

A Figura 3.9 ilustra as fases e os componentes normalizados das estações de carregamento de VEs.

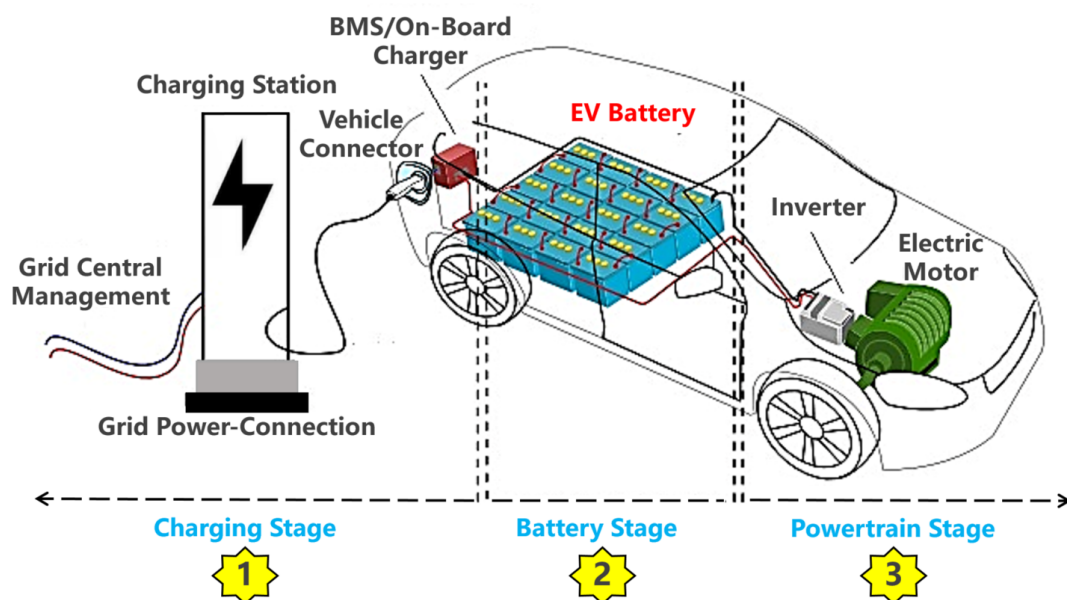


Figura 3.9: Etapas e componentes de estações de carregamento de veículos elétricos.

Retirado de: Amer et al. 2024

A título informativo, segundo as informações do Automóvel Club de Portugal 2022, o número de veículos eletrificados em Portugal tem aumentado, ao qual correspondeu, em igual






	Type 1	Carregamento Normal	
AC	Type 2 ou Mennekes	Carregamento Normal (também disponível em carregamento rápido com AC)	
	Schuko	Carregamento Normal (mas mais lento)	
DC	CCS Combo	Carregamento Rápido	
	CHAdeMO	Carregamento Rápido	

Figura 3.10: Fichas para carregamento de viaturas eletrificadas em função do tipo de corrente utilizada.

Adaptado de: Automóvel Club de Portugal 2022

movimento a quantidade de carregadores na rede pública. Na mesma página, é relatado que «só a rede Mobi.E — rede de postos de carregamento de veículos elétricos de acesso universal — conta[va], em 2022, com mais de 2.800 postos» em Portugal.

Apesar de simples, dependendo do veículo e do posto de carregamento, a recarga das baterias é realizada com cabos (fichas) diferentes. Na Figura 3.10 estão ilustrados as fichas mais comuns dos cabos de carregamento, sendo que a «ficha Type 2 ou Mennekes é a mais utilizada na Europa, tendo sido definida como a tomada padrão nos carros elétricos» (Automóvel Club de Portugal 2022).

Capítulo 4

Rendimento de Baterias

4.1 Os Efeitos da Temperatura no Rendimento de Baterias

O desempenho das baterias em veículos elétricos (e eletrificados no geral) é significativamente influenciado pela temperatura, sendo este um dos fatores mais críticos para a sua eficiência operacional, longevidade e segurança. Nesta secção são analisados os diversos aspetos da relação entre temperatura e rendimento das baterias, com particular ênfase nas baterias de iões de lítio, atualmente dominantes no mercado automóvel.

A temperatura afeta múltiplos parâmetros das baterias, nomeadamente a capacidade de armazenamento, potência disponível e velocidade de carregamento. Jaguemont, Boulon e Dubé 2016 demonstraram que, **a baixas temperaturas**, a cinética das reações eletroquímicas das baterias é significativamente reduzida, resultando numa conseqüente diminuição da condutividade iónica do eletrólito e num aumento da resistência interna da bateria. Isto leva, naturalmente, à diminuição da autonomia dos veículos. Segundo Zhao et al. 2015, a temperaturas inferiores a 0 °C, a capacidade disponível pode reduzir-se até 40% comparativamente ao desempenho à temperatura ambiente. De acordo com os mesmos autores, este fenómeno deve-se principalmente à redução da mobilidade dos iões de lítio no eletrólito e à diminuição da taxa de difusão nos materiais ativos dos elétrodos. Em adição, Jaguemont, Boulon e Dubé 2016 observaram que a -20 °C, a capacidade da bateria pode cair para apenas 60% do seu valor nominal.

No extremo oposto, **a temperaturas elevadas**, embora inicialmente possam resultar num aumento do desempenho devido à maior mobilidade iónica, os processos de degradação são significativamente acelerados. Conforme identificado por Feng et al. 2018, temperaturas superiores a 45 °C podem causar:

- Decomposição acelerada do eletrólito;
- Crescimento excessivo da camada SEI;
- Perda de material ativo através de reações secundárias;
- Aumento da pressão interna nas células.

Zhang et al. 2022 acrescentam ainda que temperaturas elevadas podem levar à formação de gases dentro das células, aumentando o risco de inchaço e, em casos extremos, explosão.

4.1.1 Gestão Térmica em Baterias Automóveis

Como visto acima, a temperatura permanece um fator determinante no desempenho e segurança das baterias em veículos eletrificados. De forma a mitigar os efeitos adversos da

temperatura, os fabricantes implementam nos seus veículos sistemas sofisticados de gestão térmica, também conhecidos BTMS (do inglês, Battery Thermal Management Systems). Panchal et al. 2016 demonstraram que estes sistemas visam manter a temperatura da bateria dentro de uma faixa ótima, tipicamente entre 15 °C e 35 °C, no caso de baterias *Li – ion*. Os BTMS modernos utilizam várias estratégias de arrefecimento, entre as quais:

- Arrefecimento por ar (passivo ou ativo):
Este método utiliza o fluxo de ar, forçado ou não, para remover o calor das células, tal como ilustrado na Figura 4.1. É simples e de baixo custo, mas menos eficiente em condições extremas (Zhang et al. 2022), sendo tipicamente utilizado em veículos com packs de baterias mais pequenos como os veículos híbridos.
- Arrefecimento por líquido:
Trata-se de um método com a eficiência superior em relação ao anterior, especialmente para baterias de alta capacidade, como em BEVs. O líquido refrigerante circula através de placas ou tubos, em contacto direto com as células, de forma semelhante ao arrefecimento por ar (Panchal et al. 2016).
- Materiais de mudança de fase (PCM):
O uso de PCMs garante a absorção do excesso de calor durante picos de temperatura, oferecendo uma solução passiva e eficiente (Zhao et al. 2015).
- Sistemas híbridos (mistos):
Combinam os métodos acima para otimizar o desempenho em várias condições.

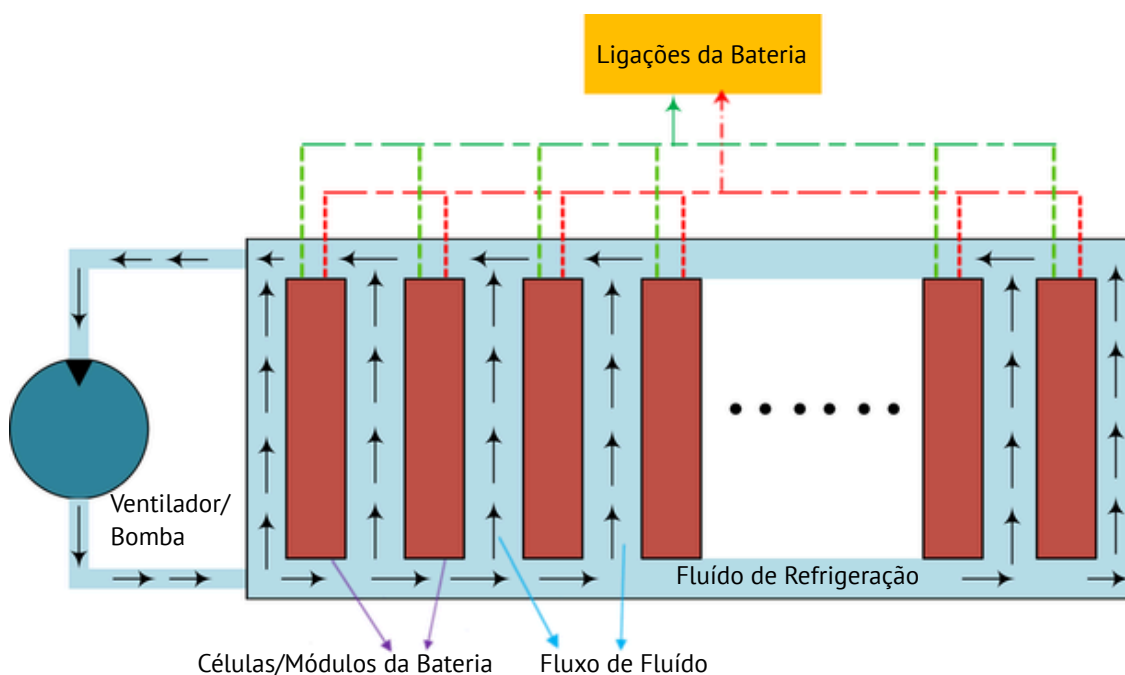


Figura 4.1: Arrefecimento de uma bateria por fluxo de fluido - ar forçado ou líquido refrigerante

Adaptado de: Asif Afzal e Ramis 2021

Além dos métodos de arrefecimento referidos, é igualmente importante a questão do aquecimento, cujos métodos podem funcionar de forma similar. Em adição, é também frequentemente utilizado o aquecimento por resistência elétrica, que, apesar do consumo energético

significativo, garante uma resposta rápida num sistema simples e eficaz, sendo especialmente útil para o pré-condicionamento das baterias antes da operação em ambientes frios. O pré-condicionamento é um sistema presente em alguns modelos, como o Tesla Model 3, que consiste no aquecimento prévio da bateria, quando programada uma hora de utilização do veículo. Neste veículo, «o pré-condicionamento aquece a bateria para um desempenho melhorado e assegura uma climatização confortável do habitáculo à sua hora de partida definida» (Tesla 2024). No entanto, este sistema é acionado automaticamente no carregamento: «se não programar um pré-condicionamento, o Model 3 apenas aquece a bateria antes do carregamento se a bateria estiver demasiado fria para carregar, e não prepara a climatização do habitáculo» (Tesla 2024).

Segundo o fabricante, a utilização do pré-condicionamento é benéfica, uma vez que «pode ajudar a aumentar a autonomia durante a próxima viagem, pois um habitáculo e uma bateria pré-condicionadas consomem menos energia quando começar a conduzir». Ademais, este sistema consegue «reduzir o consumo de energia em veículos com bombas de calor, pois o calor na bateria pode ser utilizado para aquecer o habitáculo durante a condução» (Tesla 2024).

Conforme enfatizado por Jaguemont, Boulon e Dubé 2016, juntamente com os BTMS e os seus métodos de arrefecimento/aquecimento, os fabricantes, na fase de design e projeto devem:

- Localizar estrategicamente os packs de baterias, posicionando-os de forma a minimizar a exposição a fontes externas de calor ou frio;
- Fazer o isolamento térmico apropriado, utilizando materiais que possam manter a temperatura da bateria estável, mesmo em condições ambientais extremas; e
- Implementar sistemas de segurança redundantes, com múltiplas camadas de proteção contra sobreaquecimento ou congelamento.

Feng et al. 2018 acrescentam ainda que o design deve também considerar a facilidade de manutenção e substituição dos componentes do sistema de gestão térmica. A eficácia destes sistemas é crucial para maximizar tanto o desempenho como a vida útil das baterias. Segundo Zhang et al. 2022, um BTMS bem projetado em concordância com o caso de aplicação da bateria pode prolongar a sua vida útil em até 15 % e melhorar a eficiência de carregamento em condições extremas.

4.1.2 Thermal Runaway

O *thermal runaway*, também chamado de fuga térmica, é um fenómeno crítico que afeta a segurança das baterias de íões de lítio em veículos elétricos. Este é um processo irreversível que pode resultar em falhas graves, incêndios e explosões, representando um risco significativo para os utilizadores e para a integridade dos veículos (Sun, B. Wang e Z. Wang 2024).

Segundo Sun, B. Wang e Z. Wang 2024, o processo de *thermal runaway* ocorre quando a temperatura da bateria aumenta rapidamente de forma descontrolada, desencadeando uma série de reações químicas em cadeia:

1. Início: A temperatura da bateria excede a gama normal de funcionamento, levando à decomposição da película da SEI na superfície do eletrodo negativo.
2. Reações secundárias: O eletrodo negativo, o eletrólito e o adesivo reagem adicionalmente, libertando mais ainda calor.

3. Curto-circuito interno: O separador entre os eléctrodos derrete, o que causa um curto-circuito entre os eléctrodos positivo e negativo, acelerando o processo.
4. Decomposição do eletrólito: O eletrólito decompõe-se, produzindo gases combustíveis que se podem inflamar.
5. Decomposição dos materiais dos eléctrodos: Em temperaturas extremamente elevadas, os materiais dos eléctrodos decompõem-se nos seus componentes, libertando iões de lítio e carbono.

Estes acontecimentos podem ser resumidos a três fases, retratadas por Liu et al. 2018 (ver Figura 4.2), sendo elas:

- Fase 1: O início do sobreaquecimento. As baterias passam de um estado normal para um estado anormal e a temperatura interna começa a aumentar.
- Fase 2: Acumulação de calor e processo de libertação de gás. A temperatura interna aumenta rapidamente e a bateria sofre reacções exotérmicas.
- Fase 3: Combustão e explosão. O eletrólito inflamável entra em combustão, provocando incêndios e até explosões.

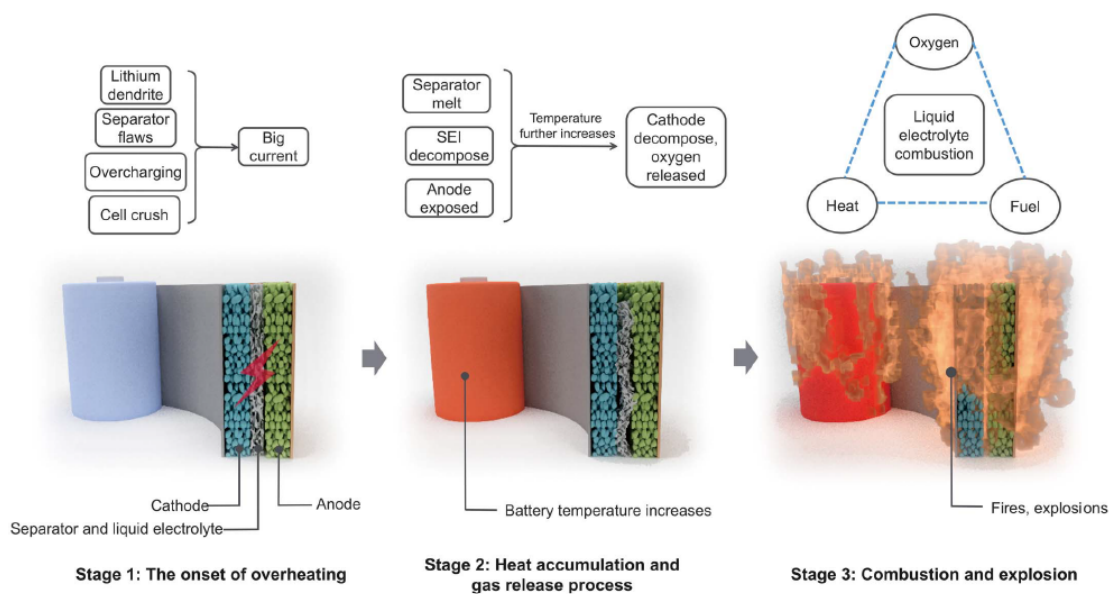


Figura 4.2: Três fases do processo de *thermal runaway*.

Retirado de: Liu et al. 2018

O ambiente térmico no interior de uma bateria *Li-ion* pode ser simulado por uma técnica de calorimetria de taxa acelerada (ARC), facilitando a compreensão da cinética da reacção de *thermal runaway*. A Figura 4.3 mostra uma curva ARC típica de uma bateria registada durante os testes de abuso térmico.

Causas do Thermal Runaway

No seu trabalho, Sun, B. Wang e Z. Wang 2024 apresentam que o fenómeno de fuga térmica pode ser desencadeado por vários fatores, a saber:

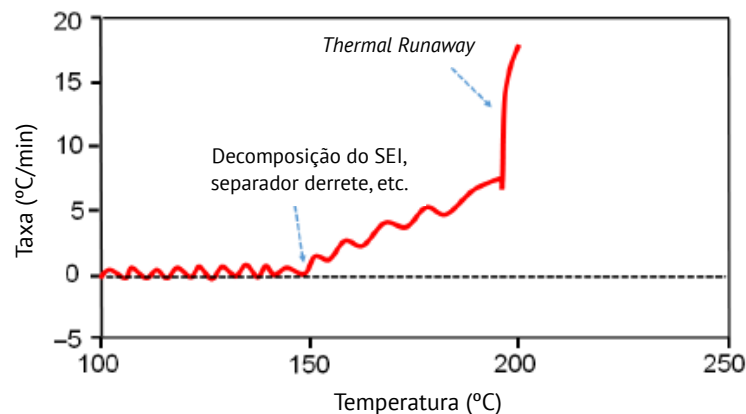


Figura 4.3: Valores típicos da taxa de auto-aquecimento efetuados em ARC durante o ensaio de resistência térmica de uma bateria *Li – ion*.

Adaptado de: Liu et al. 2018

- **Indução mecânica:**

Este tipo de indução ocorre quando a bateria é submetida a forças externas que comprometem a sua integridade estrutural. Inclui situações de compressão, onde a bateria é sujeita a pressões anormais, colisões que podem causar danos internos, e perfurações que rompem diretamente os componentes da bateria. Estas ações mecânicas podem levar à deformação da bateria, causando a rutura do separador interno e provocando curto-circuitos, uma vez que, com impactos externos é possível provocar deslocamento dos componentes internos da bateria, alterando a sua configuração original e potencialmente criando pontos de contacto indesejados entre diferentes partes da bateria.

- **Indução térmica:**

A indução térmica está relacionada com a exposição da bateria a condições de temperatura extremas ou variações térmicas significativas. Quando a bateria é exposta a temperaturas elevadas, podem iniciar-se reações químicas indesejadas no seu interior. Problemas de contacto entre os diversos componentes no pack de baterias podem gerar pontos quentes localizados, que atuam como catalisadores para o início do *thermal runaway*. Adicionalmente, em condições de temperatura elevada, o material do cátodo pode liberar oxigénio, que por sua vez pode reagir com gases redutores presentes, aumentando significativamente o risco de reações secundárias potencialmente perigosas.

- **Uso elétrico indevido, por sobrecarga, descarga excessiva ou curto-circuito externo:**

- A sobrecarga é um problema comum, onde a bateria continua a receber corrente além da sua capacidade máxima, levando à formação de dendrites de lítio no eletrodo negativo e à produção excessiva de calor e gases.
- A descarga excessiva pode causar a dissolução do coletor do eletrodo negativo e a formação de dendrites de íons de cobre, comprometendo a integridade da bateria.
- Os curto-circuitos externos, que ocorrem quando há uma conexão direta e não intencional entre os terminais positivo e negativo da bateria, podem causar um rápido aumento da temperatura, iniciando o processo de *thermal runaway*.

- **Curto-circuitos internos:**

Os curto-circuitos internos são particularmente perigosos e podem ter origens diversas. Podem ser causados por defeitos de fabrico, onde imperfeições na construção da bateria criam pontos de contacto indesejados; a contaminação dos materiais durante o processo de produção pode introduzir partículas condutoras que facilitam a formação de caminhos de curto-circuito. Por outro lado, a degradação do separador ao longo do tempo, seja por uso normal ou por utilização em condições adversas, pode também levar a curto-circuitos internos.

O *thermal runaway* representa um risco significativo para a segurança dos veículos elétricos, uma vez que compromete a funcionalidade do veículo e aumenta o risco de incêndios e explosões, pondo em perigo vidas humanas e propriedades. Sun, B. Wang e Z. Wang 2024 apresentam várias estatísticas que revelam que:

- Aproximadamente 26 % dos incidentes de incêndio em veículos elétricos ocorrem durante as sessões de carregamento, devido a:
 - Ignição direta da bateria;
 - Mau funcionamento do equipamento de carregamento;
 - Sobrecarga da bateria.
- Cerca de 13 % dos incêndios acontecem quando os veículos estão estacionados, especialmente em climas com variações significativas de temperatura entre o dia e a noite. Esta situação é agravada pela falta de consciencialização dos condutores sobre questões de segurança.

4.2 Carga/Descarga de Baterias

4.2.1 Estratégias e Métodos de Controlo de Carga

O principal objetivo dos métodos de controlo do carregamento é aumentar o SoC de uma bateria. No entanto, parâmetros como o desempenho da bateria, o tempo de carregamento, a proteção da bateria contra sobrecarga/sobredescarga e o aumento da vida útil são também muito importantes (Banguero et al. 2018). Tais parâmetros tornam o processo de carregamento da bateria não linear, e, por isso, foram desenvolvidos diferentes métodos para eficazmente fazer o seu controlo. Os métodos de controlo habitualmente utilizados no carregamento de baterias são, de forma sumária, descritos abaixo:

- **Corrente Constante (CC):**

Este método consiste em carregar a bateria com uma corrente constante. Este método limita a corrente para evitar a corrente excessiva da carga inicial, onde o valor da tensão dependerá da corrente de carga. Uma vantagem deste método é o cálculo fácil do tempo de carga e do SoC. Como a tensão não é normalmente controlada, isto pode causar uma sobrecarga da bateria e um aumento da temperatura, resultando na degradação da vida da bateria (Banguero et al. 2018).
- **Tensão Constante (CV):**

Este método é normalmente utilizado para carregar a bateria através da aplicação de, tal como o nome indica, uma tensão constante nos seus terminais. Durante a fase inicial do carregamento, a corrente de carga é elevada, diminuindo à medida que a tensão da bateria atinge o limite de tensão definido pelo carregador (Banguero et al.

2018). Este tipo de controlo é utilizado em aplicações que requerem períodos de carregamento prolongados para atingir a carga total. Como requer um longo tempo de carregamento, pode causar aumentos de temperatura e degradação da vida útil da bateria (Banguero et al. 2018).

- **Corrente Constante-Tensão Constante (CC-CV):**
Este método de carregamento é também conhecido como método de dois passos, uma vez que combina os dois métodos anteriores. A CC é aplicada na fase inicial (1^o passo) de carregamento até a tensão da bateria atingir um estado de sobrecarga ou uma tensão predefinida. Numa segunda fase (2^o passo), o método de carregamento muda para CV para manter a tensão da bateria, de modo a evitar a sobretensão (Banguero et al. 2018). Segundo estudos referidos pelos autores, o método de carregamento CC-CV é o mais eficiente para o carregamento de baterias, independentemente do seu tipo, sendo também o mais utilizado. No entanto, a sua velocidade e eficiência de carregamento são muito baixas. Ademais, o CC-CV não é adequado para o carregamento rápido, já que o estágio de carregamento CV prolonga o tempo de carregamento, causando aumentos de temperatura da bateria e reduções no ciclo de vida da bateria (Banguero et al. 2018).
- **Carregamento por Impulsos (PC):**
Este método de carregamento consiste em aplicar periodicamente uma corrente pulsada (impulsos elétricos) à bateria. As baterias são completamente descarregadas e recarregadas periodicamente no que é chamado de carga de equalização, tornando a tensão da bateria mais estável. Neste método de carregamento, é importante ter em conta a frequência, o pico do impulso e a largura do impulso, porque estão relacionados com a capacidade e o tempo de carregamento. Este método pode reduzir a polarização para evitar o aumento da temperatura da bateria, no entanto, é um método complexo (Banguero et al. 2018).
- **Carregamento por Impulso Negativo (NPC):**
Trata-se de uma melhoria do PC, onde segue a seguinte sequência de carregamento: um impulso de carregamento positivo, um período de repouso (sem carregamento) e um impulso de descarga (*burp*). Este método pode eliminar a polarização, diminuindo assim o aumento da temperatura, apesar de poder reduzir a eficiência de carga (Banguero et al. 2018).
- **Corrente Cónica (TC):**
Este método consiste em fornecer à bateria uma carga CC a 0.01 C, de forma contínua, sendo possível carregar a bateria até 100% utilizando uma corrente de carga muito pequena. É normalmente aplicado em baterias de arranque (SLI), mas não é adequado para baterias suscetíveis de serem danificadas por sobrecarga, tendo sido concebido para compensar a auto-descarga da bateria (Banguero et al. 2018).
- **Carga de Flutuação (FC):**
Este método envolve uma carga CV definida para um valor apenas suficiente para terminar a carga da bateria ou para manter a carga completa da bateria, sendo utilizado para baterias estacionárias, principalmente baterias de chumbo-ácido (Banguero et al. 2018).

A título demonstrativo, na Figura 4.4 está ilustrado graficamente o carregamento de uma bateria AGM onde são aplicados alguns dos métodos de carga abordados.

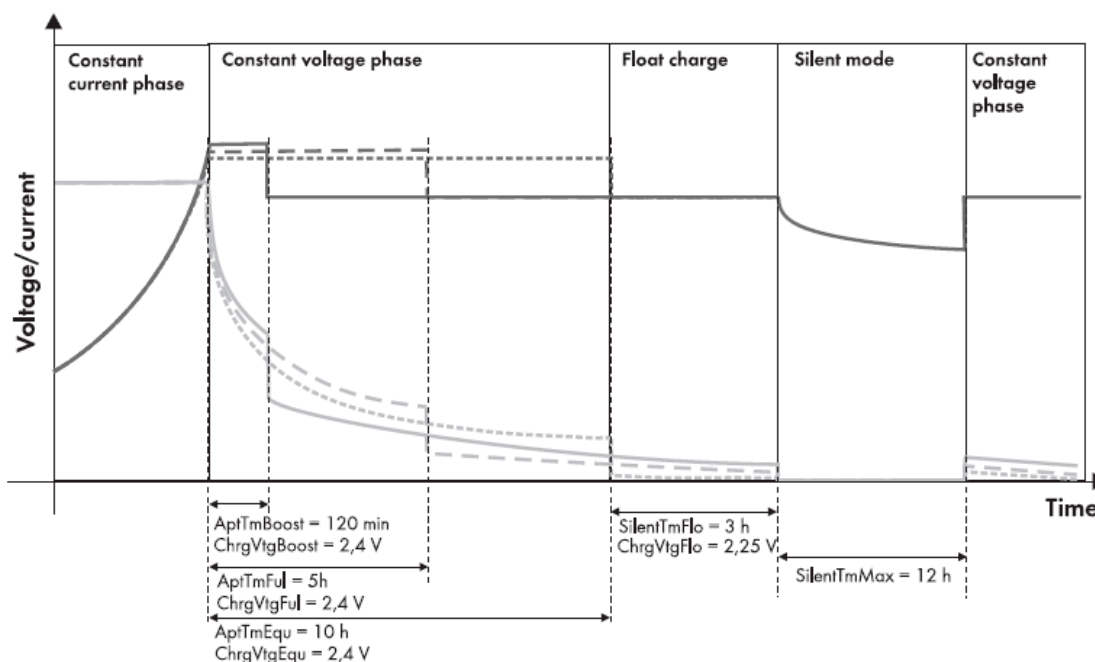


Figura 4.4: Fases de carregamento e valores típicos de um inversor *Sunny Island* numa bateria AGM.

Retirado de: Banguero et al. 2018.

Legenda

AptTmBoost	Tempo de absorção da carga de reforço
ChrgVtgBoost	Ponto de regulação da tensão da célula na carga de reforço
AptTmFul	Tempo de absorção da carga completa
ChrgVtgFul	Ponto de regulação da tensão da célula para carga completa
AptTmEqu	Tempo de absorção para carga de equalização
ChrgVtgEqu	Ponto de regulação da tensão da célula para equalização
SilentTmFlo	Tempo até à passagem para o modo de poupança de energia
ChrgVtgFlo	Ponto de regulação da tensão da célula para carga de flutuação
SilentTmMax	Duração máxima do modo de poupança de energia

4.2.2 Estratégias e Métodos de Controlo de Descarga

Para além dos diferentes métodos de carga, importa considerar também os diversos regimes sob os quais a descarga de baterias pode ser efetuada. À semelhança das estratégias de carga, a escolha do método do controlo de descarga faz afetar diretamente o comportamento elétrico das células, o seu envelhecimento, além da estimativa do estado de carga (SoC) e da capacidade útil.

Numa análise experimental realizada por Abbas et al. 2016 foi comparado o comportamento de células durante a descarga controlada segundo três métodos comuns de descarga distintos, sendo eles:

- Corrente Constante (CC):

A corrente de descarga é mantida constante durante todo o processo. Este é o método mais amplamente utilizado em aplicações de caracterização, permitindo um controlo direto da corrente e uma relação linear entre corrente e capacidade descarregada.

- **Potência Constante (CP):**
Neste modo, a potência descarregada pela célula é mantida constante. A corrente aumenta progressivamente à medida que a tensão da célula diminui, resultando num esforço crescente da célula em fases mais avançadas da descarga.
- **Impedância Constante (CI):**
A célula é descarregada através de uma carga resistiva fixa, o que leva a uma diminuição da corrente ao longo do tempo, proporcional à queda de tensão. Este modo simula aplicações onde a carga elétrica tem comportamento óhmico.

O estudo experimental realizado pelos autores demonstra que a tensão terminal da célula decresce de forma distinta em cada regime. Num extremo, encontra-se o modo de Potência Constante (CP), que impõe um esforço adicional à célula, com correntes elevadas na fase final da descarga, resultando num aumento da taxa de aquecimento e aceleração do envelhecimento eletroquímico. Em oposição, o modo de Corrente Constante (CC) apresenta maior previsibilidade e menor exigência térmica, sendo, por isso, mais adequado para ensaios repetíveis e de determinação de capacidade nominal (Abbas et al. 2016).

Em adição e em linha com os métodos de controlo de carga, Tycorun Energy 2023¹ apresenta outras estratégias utilizadas na indústria, tais como:

- **Tensão Constante (CV):**
Este método consiste em manter a tensão da bateria constante, enquanto a corrente inicial é elevada e vai diminuindo gradualmente ao longo do processo. A descarga termina quando a corrente atinge um valor mínimo pré-definido. A utilização isolada deste método não é recomendada.
- **Corrente Constante – Tensão Constante (CC–CV):**
Utilizando esta combinação, a descarga inicia-se em corrente constante (CC) até que a tensão da bateria atinja a tensão final de descarga. Em seguida, mantém-se a tensão constante (CV) enquanto a corrente diminui até ao valor mínimo definido, momento em que a descarga é concluída.
- **Potência Constante – Corrente Constante – Tensão Constante (CP–CC–CV):**
Neste método, a descarga inicia-se em modo de potência constante até atingir a tensão final de descarga. Se, no final da fase CP, a corrente for superior à definida para a fase CC seguinte, a tensão de descarga aumenta inicialmente e depois decresce até à tensão final. Em seguida, mantém-se a tensão constante (CV) até que a corrente diminua para o valor especificado, momento em que a descarga é concluída.
- **Resistência Constante (CR):**
Neste modo, aplica-se uma resistência externa fixa ao circuito, obedecendo à relação $U = I \times (R_{\text{externa}} + DCR^2)$. Como a resistência externa permanece constante e suficientemente elevada, a corrente de descarga diminui gradualmente à medida que a tensão da bateria decresce até ao valor de tensão final.
- **Resistência Constante – Tensão Constante (CR–CV):**
Com este método, a descarga inicia-se com resistência constante até atingir a tensão

¹Tycorun Energy (designação comercial de Guangzhou Tycorun Energy Co., Ltd.) é uma empresa chinesa especializada na produção de baterias de íões de lítio, sistemas de gestão de baterias e soluções de troca rápida de baterias aplicados à mobilidade elétrica.

²DCR – Resistência interna da bateria (R_{interna}), do inglês *Direct Current Resistance*

final de descarga. Em seguida, mantém-se a tensão constante (CV) até que a corrente diminua para o valor especificado, momento em que a descarga é concluída.

Para melhor sintetizar as diferentes estratégias de carga (secção 4.2.1) e descarga (secção 4.2.2) descritas anteriormente, a Tabela 4.1 apresenta de forma comparativa os principais métodos de controlo de carga e descarga de baterias, evidenciando a evolução típica da corrente e da tensão em cada caso.

Tabela 4.1: Métodos de controlo de carga e descarga de baterias.
Adaptado de: Tycorun Energy 2023

Processo	Método	Variação da corrente	Variação da tensão
Carga	CC	Constante	Aumenta gradualmente
	CV	Diminui gradualmente	Constante
	CC–CV	Constante, depois diminui	Aumenta gradualmente, depois constante
	PC	Pulsada (impulsos elétricos)	Oscila em função dos impulsos
	NPC	Impulso positivo, repouso, impulso negativo	Oscila em função dos impulsos
	TC	Constante ($\approx 0,01C$)	Aumenta lentamente até ao fim da carga
	FC	Corrente reduzida de compensação	Constante (valor de flutuação)
Descarga	CC	Constante	Diminui gradualmente
	CP	Aumenta gradualmente	Diminui gradualmente
	CI	Diminui gradualmente	Diminui gradualmente
	CV	Diminui gradualmente	Constante
	CC–CV	Constante, depois diminui	Diminui gradualmente, depois constante
	CP–CC–CV	Aumenta, constante, depois diminui	Diminui, aumenta, depois diminui e no fim constante
	CR	Diminui gradualmente	Diminui gradualmente
	CR–CV	Diminui gradualmente	Diminui gradualmente, depois constante

4.2.3 Balanceamento de Carga

O balanceamento de células é uma técnica essencial na gestão de baterias, especialmente em sistemas onde várias células são conectadas em série, como em veículos eletrificados. Este processo procura mitigar os efeitos das diferenças intrínsecas e extrínsecas entre células, incluindo variações na capacidade, resistência interna e taxas de auto-descarga, que podem levar a um desequilíbrio no estado de carga (SoC). Esta situação afeta negativamente o desempenho, a segurança e a vida útil das baterias, tornando o balanceamento uma função crítica de um sistema de gestão de baterias, comumente chamado de BMS, do inglês *Battery Management System* (Koraddi et al. 2022; Lee, Jeon e Bae 2016).

Durante o processo de carga, a falta de balanceamento das células pode causar a interrupção prematura do funcionamento da bateria. Esta situação ocorre, durante a descarga, células com SoC mais baixo atingem rapidamente o limite de tensão mínima, forçando o sistema a interromper a descarga para evitar danos às células. Da mesma forma, durante a carga, quando uma célula com SoC mais alto atinge seu limite de tensão máxima, enquanto outras permanecem abaixo de sua capacidade total. Estas situações, ilustradas de forma simples na Figura 4.5, resultam em perda de energia e capacidade utilizável, reduzindo a eficiência do sistema como um todo (Lee, Jeon e Bae 2016; Qi e Dah-Chuan Lu 2014).

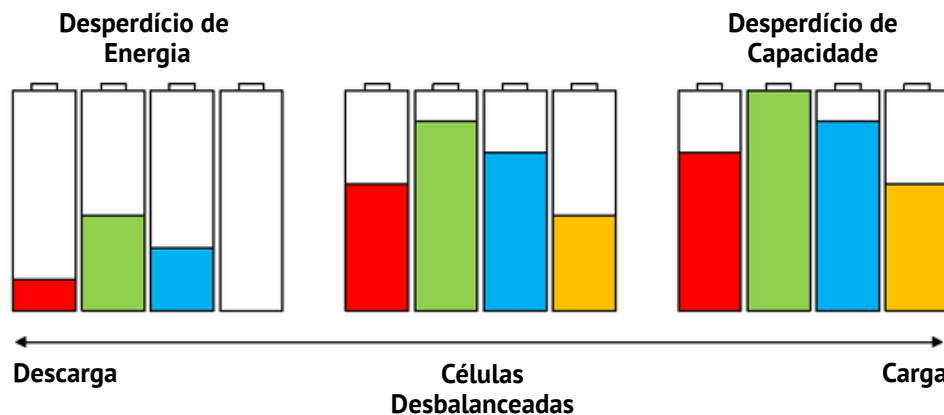


Figura 4.5: Perda de energia e de capacidade em células não balanceadas.
Adaptado de: Qi e Dah-Chuan Lu 2014

Existem duas categorias principais de técnicas de balanceamento de células: balanceamento passivo e balanceamento ativo.

No **balanceamento passivo**, a energia excedente das células com maior carga é dissipada na forma de calor por meio de resistências conectadas em paralelo às células. Esse método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e baixo custo de implementação, sendo adequado para aplicações onde eficiência energética não é uma prioridade, como em dispositivos de baixa potência. O desperdício de energia resultante deste método leva a perdas térmicas significativas que, além de reduzir a eficiência geral do sistema, podem exigir estratégias adicionais de gestão térmica para dissipar o calor gerado e evitar sobre-aquecimento, o que, como já foi apresentado anteriormente, é prejudicial para a vida útil do sistema de acumulação de energia (Koraddi et al. 2022; Lee, Jeon e Bae 2016; Qi e Dah-Chuan Lu 2014).

Por outro lado, as técnicas de **balanceamento ativo** oferecem uma abordagem mais eficiente e sofisticada. Em vez de desperdiçar a energia excedente, essas técnicas utilizam componentes, como condensadores e outros, para transferir energia de células com maior carga para aquelas com menor carga. Essa redistribuição permite que a energia seja utilizada de forma mais produtiva, aumentando a eficiência do sistema e prolongando a vida útil da bateria (Lee, Jeon e Bae 2016; Qi e Dah-Chuan Lu 2014). No entanto, as soluções de balanceamento ativo exigem circuitos mais complexos, com sensores de alta precisão e controladores avançados. Além disso, os custos de fabricação e manutenção são consideravelmente mais elevados do que os métodos passivos, tornando as soluções ativas mais adequadas para aplicações onde a eficiência e a longevidade do sistema de bateria justificam o investimento. (Koraddi et al. 2022; Qi e Dah-Chuan Lu 2014).

Na prática, as duas categorias representam abordagens complementares que devem ser escolhidas com base nos requisitos específicos da aplicação, equilibrando fatores como custo, eficiência energética, complexidade de implementação e impacto na durabilidade do sistema.

4.2.4 Importância da Gestão dos Ciclos de Carga/Descarga em Baterias

Segundo Thangavel et al. 2023, o controlo dos ciclos de carga/descarga em baterias de veículos eletrificados é um aspeto crucial para o desempenho e longevidade destes sistemas de armazenamento de energia. O BMS desempenha um papel fundamental neste processo, monitorizando e gerindo diversos parâmetros críticos das baterias.

De acordo com os autores, o BMS é responsável por controlar, entre outros, o estado de carga (SoC), o estado de saúde (SoH) das baterias, garantindo que os ciclos de carga e descarga sejam realizados de forma otimizada. Este controlo preciso ajuda a prevenir a sobrecarga e a descarga profunda, que podem danificar as células da bateria e reduzir significativamente sua vida útil. O BMS regula também, além destes e igualmente importante, a temperatura da bateria, crucial para manter a eficiência e a segurança do sistema.

Um controlo eficiente dos ciclos de carga/descarga contribui para aumentar a autonomia permitida pelas baterias, um dos principais desafios enfrentados por esta tecnologia. Ao otimizar estes ciclos, é possível maximizar a capacidade de armazenamento de energia da bateria e, conseqüentemente, aumentar a distância que o veículo pode percorrer com uma única carga (Thangavel et al. 2023). Além disso, o controlo adequado dos ciclos tem implicações significativas para a infraestrutura de carregamento, uma vez que, sistemas de carregamento rápido, por exemplo, exigem uma gestão cuidadosa para evitar danos à bateria e garantir a segurança do processo (Thangavel et al. 2023).

Em complemento com os sistemas de controlo das baterias, é uma boa prática preferir a utilização de ciclos parciais, isto é manter a DoD entre 20% e 80%, preterindo os ciclos completos. Desta forma, é possível prolongar significativamente a vida útil da bateria, evitando as descargas profundas e sobrecargas, que podem causar danos irreversíveis às células.

Segundo a literatura, o número de ciclos de carga/descarga que uma bateria pode suportar antes de apresentar degradação significativa é tipicamente em torno de 3000. No entanto, este valor pode variar consideravelmente dependendo das condições de uso e da qualidade do controlo implementado.

É por estes motivos que os sistemas de gestão de baterias (BMS) são essenciais para monitorizar parâmetros críticos como tensão, corrente e temperatura durante os ciclos de carga e descarga, permitindo intervenções em tempo real para otimizar o desempenho e prevenir falhas.

4.3 Eficiência de Baterias

O rendimento de baterias é um aspeto crucial no desenvolvimento e uso quer de dispositivos eletrónicos portáteis, quer no âmbito deste trabalho, em veículos. Refere-se à eficiência com que uma bateria converte energia química armazenada em energia elétrica utilizável (útil). Este parâmetro é influenciado por diversos fatores analisados anteriormente, tais como temperatura, ciclos de carga e descarga, idade da bateria e condições de uso.

Na prática, nenhuma bateria possui rendimento de 100 %, uma vez sempre existem perdas na forma de calor durante os processos de carga e descarga, mesmo que mínimas, para não falar na taxa de auto-descarga.

4.3.1 Eficiência Coulombica em Baterias

Conforme exposto por Xiao et al. 2020, por definição, a EC (eficiência coulombica) é «a razão entre a capacidade de descarga (C_D) e a capacidade de carga (C_C) de um eletrodo específico numa célula» (equação 4.1). De modo mais específico, e considerando uma bateria *Li-ion*, como a capacidade é medida pelo fluxo total de carga de ou para um eletrodo e a capacidade total é geralmente limitada pelo cátodo, «a EC pode também ser expressa como a razão entre a quantidade de iões Li^+ ou eletrões (e^-) que retornam ao cátodo e a quantidade de iões Li^+ ou eletrões (e^-) que partem do cátodo num ciclo completo».

$$EC(\%) = \frac{C_D}{C_C} \times 100 \quad (4.1)$$

Pela fórmula apresentada pelos autores, assumindo que não existem reações laterais nos eletrodos numa célula ideal, o fluxo de iões Li^+ ou eletrões deve resultar exclusivamente de reações eletroquímicas reversíveis, e desta forma, a EC seria igual a 100 %.

No entanto, em células reais, as reações laterais entre os eletrólitos e os eletrodos estão presentes, sendo estas químicas ou eletroquímicas. No caso das reações químicas, os eletrões gerados podem ou não ser recolhidos pelos coletores de corrente, dependendo dos caminhos das reações; nas reações eletroquímicas, a perda e aceitação de eletrões ainda ocorre nos coletores de corrente, mas de forma irreversível. A decomposição do eletrólito, através de fenómenos como a polimerização, pode gerar subprodutos irreversíveis, que não são eletroquimicamente ativos. Esses subprodutos tornam os eletrões libertados adquiríveis pelos coletores de corrente, o que pode ser incluído no cálculo da eficiência coulombica (EC), complicando a sua interpretação (Xiao et al. 2020).

Segundo os autores, no caso particular de baterias de iões de lítio, o ânodo é geralmente de grafite, e os iões Li^+ estão armazenados no cátodo (por exemplo *NMC*). Durante o carregamento, os iões Li^+ separam-se do cátodo e inserem-se na estrutura do grafite. Parte desses iões é consumida irreversivelmente na formação da SEI, resultando numa EC inferior a 100%, já que menos iões retornam ao cátodo no processo de descarga.

A maioria dos eletrões na definição de EC (equação 4.1) pode ser atribuída às reações eletroquímicas reversíveis e iguala-se ao número de iões Li^+ envolvidos na reação redox, que determina diretamente a capacidade reversível nos ciclos subsequentes. Desta forma, Xiao et al. 2020 retratam que a capacidade restante, isto é, a retenção de capacidade (*RC*) na célula após determinados n ciclos pode ser calculada de forma eficaz utilizando:

$$RC(\%) = (EC)^n \times 100 \quad (4.2)$$

A título de exemplo, se forem desejados 1000 ciclos estáveis com mais de 90% de retenção de capacidade, a EC média deverá ser, no mínimo, de 99.99 % (0.9999).

As medições de EC requerem também, segundo Xiao et al. 2020, alta precisão, juntamente com controlo de temperatura e pressão, caso se deseje uma previsão real e concreta do

desempenho a longo prazo. Para estimar a retenção de capacidade é necessário uma receita de eletrólito otimizada, elétrodos estáveis e condições de teste/utilização consistentes.

4.3.2 Eficiência Energética do Ciclo de Carga e Descarga de Baterias

De acordo com a informação vista até aqui, a eficiência energética de uma bateria, considerando o seu ciclo de carga e descarga, corresponde, de forma simplificada, à relação entre a energia fornecida na descarga e a energia consumida na carga:

$$\eta_E(\%) = \frac{E_{\text{descarga}}}{E_{\text{carga}}} \times 100 \quad (4.3)$$

Esta métrica, defendida por Beard 2019, reflete não só as perdas coulombicas, mas também os efeitos da resistência interna e a diferença de tensão média entre os processos de carga e descarga. Conseqüentemente, a eficiência energética apresenta valores mais baixos do que a eficiência coulombica. Sempre que esta relação é inferior a 100 %, significa que ocorrem perdas de energia pelos efeitos anteriormente referidos, que se manifestam essencialmente sob a forma de calor. Tal como já discutido, esse calor deve ser eficientemente dissipado para evitar o sobreaquecimento da bateria (Hasan, Tom e Yuce 2023).

Neste trabalho, o termo rendimento de carga/descarga refere-se explicitamente à eficiência energética, uma vez que é esta que quantifica a fração de energia efetivamente recuperada após o processo de descarga, em comparação com a energia inicialmente fornecida.

No trabalho de Albatayneh et al. 2020, são apresentados dados quantitativos relativos à eficiência dos principais componentes da unidade motriz de veículos elétricos, estando estes resumidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Eficiência da Unidade Motriz de Veículos Elétricos por Componente

Adaptado de: Albatayneh et al. 2020

Componente	Gama de Eficiência	Eficiência*
Conversor AC/DC	90–96 %	-
Bateria INPUT	90–99 %	96 % 95 % 99 % 90 %
Bateria OUTPUT	93–98 %	95 % 96 % 93 % 98 %
Conversor DC/AC	96–98 %	-
Motor elétrico	81–95 %	-
Gerador	82–95 %	-
Transmissão mecânica	89–98 %	-

* os vários valores de eficiência provêm da compilação de informação das referências do artigo de Albatayneh et al. 2020

Com base nestes dados, é possível estimar a eficiência energética global da bateria (EEGB) ao longo do ciclo completo de carga e descarga. Esta pode ser obtida através do produto entre a eficiência de entrada (carga - INPUT), $Bat(IN)$, e a eficiência de saída (descarga - OUTPUT), $Bat(OUT)$:

$$EEGB = Bat(IN) \times Bat(OUT) \Rightarrow EEGB = \begin{cases} 0.90 \times 0.93 = 0.84 = 84 \% \\ 0.99 \times 0.98 = 0.97 = 97 \% \end{cases}$$

Desta forma, com base nos dados de Albatayneh et al. 2020, conclui-se que a eficiência do ciclo de carga e descarga de baterias se situa, de forma indicativa, entre os 84 e os 97 %.

Apesar da utilidade dos dados apresentados, importa salientar que **este estudo apresenta algumas limitações**:

- Considera exclusivamente baterias de tração utilizadas em veículos elétricos (BEV);
- Não especifica a(s) tecnologia(s) de bateria analisada(s);
- Baseia-se em referências datadas de 2010/2011, o que poderá comprometer a atualidade dos resultados, tendo em conta o rápido avanço tecnológico neste domínio.

2011 - O Caso de Estudo de Roterdão

Uma das referências utilizadas por Albatayneh et al. 2020 é um estudo desenvolvido, em 2011, no âmbito do projeto eMobility-Lab, da Universidade de Roterdão, que analisou a eficiência de travagem regenerativa em dois veículos elétricos: o Parkshuttle, um veículo autónomo de transporte público, e o Ecotruck, um camião de recolha de resíduos convertido para tração elétrica (Van Sterkenburg et al. 2011). Embora o objetivo principal fosse avaliar a regeneração de energia, a caracterização das baterias e dos seus ciclos de carga e descarga fornece dados relevantes para a análise da eficiência energética global.

Os dois veículos recorriam a tecnologias de baterias distintas: o Parkshuttle utilizava um sistema de 52 kWh baseado em 42 células de chumbo-ácido de tração, enquanto o Ecotruck operava com um sistema de 61 kWh composto por 96 células de LFP, organizadas em três módulos paralelos com 32 células em série cada. Ambas as baterias foram modeladas utilizando um circuito equivalente, permitindo estimar, com precisão, perdas internas por polarização e perdas coulombicas. A eficiência de carga foi avaliada em condições laboratoriais com base na variação de tensão de circuito aberto (OCV) em função do estado de carga (SoC), enquanto a eficiência de descarga foi determinada pela comparação entre a energia elétrica fornecida e a energia eletroquímica efetivamente extraída da célula (Van Sterkenburg et al. 2011). A Tabela 4.3 resume os principais parâmetros comparativos entre os dois sistemas de armazenamento.

Os resultados mostram que a bateria de chumbo-ácido apresenta um bom desempenho até cerca de 90 % de SoC, mas a sua eficiência decresce significativamente nos níveis superiores de carga. Já a bateria de lítio mantém uma elevada eficiência ao longo de toda a faixa de operação. A eficiência global do ciclo de carga-descarga (EEGB), resultante do produto entre as eficiências de carga e de descarga, foi estimada em 88 % para o Parkshuttle e 97 % para o Ecotruck.

Tabela 4.3: Sistemas de Bateria do estudo eMobility-Lab da Universidade de Roterdão (Van Sterkenburg et al. 2011)

	Parkshuttle	Ecotruck
Tecnologia da bateria	Chumbo-ácido	LFP
Capacidade	52 kWh	61 kWh
Configuração	42 células em série (620 Ah)	3P(32S) (96 células de 200 Ah)
Eficiência		
carga	95 % (até 90 % SoC, depois decresce até 75 %)	99 % constante
descarga	93 %	98 %
global	88 %	97 %

2023 – Avaliação da Eficiência Energética de Baterias em contexto IoT³

A avaliação da eficiência energética das baterias não deve limitar-se a valores de referência obtidos em condições laboratoriais. Na realidade, fatores operacionais como temperatura ambiente, taxa de carga e descarga (C-rate), profundidade do ciclo (DoD), envelhecimento eletroquímico e o tipo de sistema de gestão da bateria (BMS) afetam significativamente o rendimento energético efetivo dos sistemas de armazenamento.

O estudo de Hasan, Tom e Yuce 2023 compila dados comparativos de eficiência energética para várias tecnologias de baterias, permitindo uma análise transversal das perdas típicas de energia em ciclos de carga e descarga. A Figura 4.6 representa graficamente esses valores, destacando a superioridade das tecnologias à base de lítio, tanto em densidade energética (como já visto anteriormente) como, agora, em eficiência.

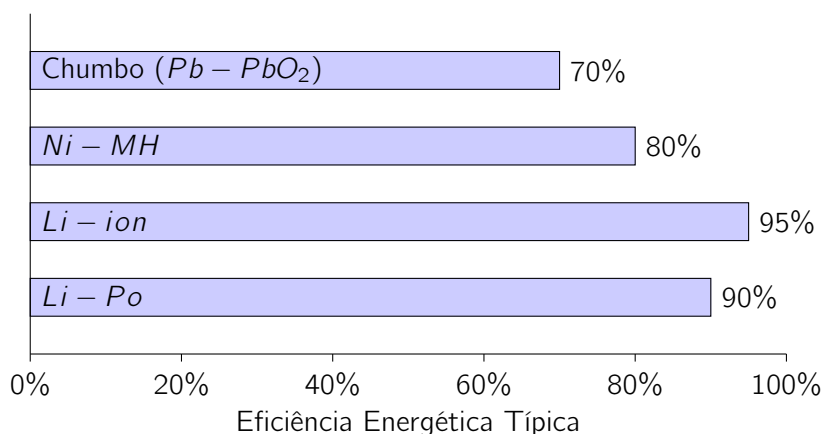


Figura 4.6: Eficiência de Baterias por Tecnologia (Hasan, Tom e Yuce 2023)

Apesar da eficiência mais reduzida da tecnologia de chumbo, os estudos mais recentes da *Battery University* (Buchmann 2017) apontam que as baterias AGM (variante de chumbo amplamente utilizada em sistemas SLI mais recentes) possuem eficiência energética superior, podendo atingir até 97 %.

³IoT (*Internet of Things* - Internet das Coisas) refere-se a uma ampla gama de aplicações que utilizam sensores, software e conectividade de rede para recolher e transmitir dados de objetos do quotidiano, melhorando a eficiência operacional e a experiência do utilizador.

De acordo com as informações de Hasan, Tom e Yuce 2023, a vantagem clara recai sobre as baterias de íons de lítio (*Li – ion*), cuja eficiência ronda os 95%, e das baterias de polímero de lítio (*Li – Po*), próximas dos 90 %, estas métricas representam médias ideais, muitas vezes obtidas em ambientes controlados. Em operação real, essas eficiências podem reduzir-se devido a fatores já referidos, tais como:

- Temperaturas extremas, que afetam a condutividade do eletrólito e aceleram reações secundárias;
- Correntes elevadas, que induzem perdas por efeito Joule e aumentam a polarização interna;
- Elevada profundidade de descarga, que acelera a degradação dos materiais ativos;
- Número acumulado de ciclos, que aumenta a resistência interna e reduz a capacidade útil.

Esta visão permite reforçar a conclusão de que a seleção da tecnologia de bateria deve considerar não só os valores de eficiência em laboratório/teóricos, mas sobretudo a robustez da tecnologia face às condições reais de operação para garantir um rendimento energético consistente ao longo do ciclo de vida do sistema.

Capítulo 5

Medição do Rendimento da Carga e Descarga de Baterias

A medição de energia em baterias deve envolver equipamentos apropriados e técnicas que assegurem precisão e fiabilidade. De forma simplificada, o processo baseia-se em medir a potência elétrica (produto da tensão e da corrente) ao longo do tempo e calcular a energia total através da integração.

Para a medição experimental propriamente dita, existem vários métodos com diferentes tipos de equipamentos, entre os quais:

- Analisador de Energia, que, além de registar a tensão (V) e corrente (I) com alta taxa de amostragem, também pode medir a potência ativa, reativa e aparente.
- Sistema de Aquisição de Dados, que recolhe dados de V e I para análise posterior. Neste sentido, um osciloscópio digital é um dos sistemas que pode ser utilizado.

Além do uso de um destes equipamentos, é necessário simular as condições reais de descarga controlada, utilizando uma carga externa, resistências ou outros componentes de carga, tais como ventiladores ou lâmpadas. Em adição, pode ser também ser interessante analisar a atividade térmica com sensores de temperatura com o objetivo de monitorizar a dissipação térmica, por exemplo.

Por forma a avaliar o rendimento das baterias nos processos de carga e descarga, foi planeado e desenvolvido um caso de estudo (ver 5.1), no qual são testadas baterias de diferentes químicas, tecnologias e aplicações, sob diversas condições, sendo posteriormente comparados todos os valores medidos. Em simultâneo, e relacionado com a temática do rendimento, foi também avaliada a capacidade real das baterias num segundo caso de estudo (CASO DE ESTUDO #2 – ver 5.2).

É importante referir que, de forma a tornar viável (por restrições de equipamento) e mais ágil a realização dos testes, foram utilizadas, sempre que possível, células individuais ou combinadas em vez de baterias completas (packs/módulos).

5.1 CASO DE ESTUDO #1 - Rendimento de Carga e Descarga de Baterias

5.1.1 Método de Medição de Energia Utilizado

A determinação do rendimento energético em ciclos de carga e descarga baseia-se na comparação entre a energia fornecida à bateria durante a carga e a energia efetivamente disponibilizada na descarga subsequente. Para esse efeito, são registados os valores instantâneos de tensão e de corrente em função do tempo, a partir dos quais se calcula a potência elétrica:

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) \quad (5.1)$$

onde $V(t)$ corresponde à tensão nos terminais da bateria e $I(t)$ à corrente aplicada.

Tal como indicado por Bird 2017, a energia é possível de ser calculada por integração, do instante inicial t_i ao instante final t_f , através de:

$$E = \int_{t_i}^{t_f} P(t) \, dt = \int_{t_i}^{t_f} [V(t) \cdot I(t)] \, dt \quad (5.2)$$

Sabendo a energia envolvida na carga e na descarga de uma dada bateria, é possível, então, calcular o seu rendimento. O rendimento das baterias é uma medida crítica que reflete sua eficiência energética durante os processos de carga e descarga.

O rendimento energético do ciclo (η) é, por fim, obtido pela razão entre a energia extraída e a energia fornecida:

$$\eta(\%) = \frac{E_{descarga}}{E_{carga}} \times 100 \quad (5.3)$$

Este método permite quantificar, de forma direta, as perdas associadas a diferentes condições de funcionamento, refletindo o impacto de fenómenos como a resistência interna da célula, a taxa de corrente (C-rate) e a profundidade de descarga. Além disso, possibilita a comparação entre tecnologias de baterias distintas em termos de eficiência energética, constituindo uma abordagem adequada para a análise experimental realizada nesta dissertação.

5.1.2 Equipamentos e Material Utilizado

Para a realização dos ensaios experimentais foi necessário recorrer a equipamentos específicos, capazes de garantir medições fiáveis e seguras em diferentes condições de carga e descarga. A seleção destes equipamentos teve em consideração não apenas a compatibilidade com diversas tecnologias de baterias, mas também o rigor científico e a capacidade de monitorizar e registar parâmetros críticos, como corrente, tensão e capacidade, assegurando a qualidade dos resultados e a proteção dos dispositivos testados. No grupo de equipamentos utilizados encontram-se:

- **iCharger DX-12:**

O iCharger DX12 é um carregador DC de elevado desempenho, desenvolvido para ensaios e gestão de diferentes tecnologias de baterias. Opera com topologia buck-boost síncrona, permitindo tanto carga como descarga com elevada eficiência. Possui dois canais independentes, cada um capaz de efetuar operações de carga/descarga em

simultâneo, até 30 A por canal. Em ambos os casos, para arrefecimento, dispõe de controlo inteligente de ventoinhas dependente da temperatura interna.

O equipamento suporta uma ampla gama de químicas de bateria, incluindo *Li – Po*, *Li – ion*, *LFP*, *LiHV*, *LTO*, *Ni – Zn*, *NiMH*, *Ni – Cd* e *Pb*, o que o torna versátil em contexto de investigação. Para monitorização, integra um ecrã IPS LCD de 2.8 in, apresentando parâmetros como tensão, corrente, potência, capacidade, resistência interna e temperatura. Outro ponto positivo é a opção de *logging* para PC e cartão SD.

Em termos de descarga, além da descarga resistiva limitada a 80 W (50 W por canal), o DX12 inclui descarga regenerativa até 1700 W (1200 W por canal) e uma opção de descarga extra que pode atingir até 3000 W (1500 W a 50 V/30 A por canal). O equilíbrio de células é realizado com correntes até 4 A (2 A por canal) (iCharger s.d.).

Na Tabela 5.1 estão reunidas as principais características deste equipamento.

Tabela 5.1: Características principais do iCharger DX12 (iCharger 2023).

Nº de canais	2 (independentes)	
Potência máxima de carga	1700 W (1200 W por canal)	
Corrente máxima de carga/descarga		50 A (30 A por canal)
	resistiva	80 W (50 W × 2 canais)
Potência máx. de descarga	regenerativa	1700 W (1200 W por canal)
	extra	1500 W @ 50 V/30 A por canal
Corrente de balanceamento	até 2 A por canal	
Químicas (modos) suportadas	<i>Li – Po</i>	<i>Ni – Zn</i>
	<i>Li – ion</i>	<i>NiMH</i>
	<i>LFP</i>	<i>Ni – Cd</i>
	<i>LiHV</i>	<i>Pb</i>
	<i>LTO</i>	User
Tensão de entrada	11–53 V	
Corrente máxima de entrada	65 A (45 A por canal)	

● SkyRC eFUEL Power Supply 1200 W

A fonte de alimentação SkyRC eFuel 1200 W é um transformador AC/DC regulado, projetado para fornecer alta potência contínua com tensão ajustável e múltiplas saídas. Este equipamento disponibiliza até 1200 W de potência contínua, com tensão de saída ajustável entre 15–30 V e corrente máxima de 50 A, assegurando alimentação estável e fiável ao ser utilizada como unidade de suporte energético do iCharger DX12 para os ensaios realizados. Apresenta elevada eficiência de conversão, proteção contra condições de falha (sobretensão, sobrecorrente e sobreaquecimento) e baixo nível de ondulação, garantindo consistência e segurança durante ciclos prolongados de carga e descarga (SkyRC Technology Co., Ltd. 2022).

Adicionalmente, revelou-se **essencial o acompanhamento do comportamento térmico das baterias durante os ciclos de carga e descarga**. Este controlo é particularmente relevante em ensaios a correntes mais elevadas, uma vez que as perdas associadas à resistência

interna das células se traduzem em aquecimento, podendo afetar tanto o desempenho como a segurança do processo. Assim, como requisito fundamental para a interpretação e validação dos resultados obtidos, o planeamento experimental integrou a monitorização térmica com recurso ao **Multímetro Digital UNI-T UT803**. Este multímetro de bancada é instrumento de medição de elevada precisão, amplamente utilizado em contextos laboratoriais e profissionais. Entre as suas múltiplas funcionalidades, destaca-se a capacidade de efetuar medições de temperatura com elevada exatidão, através da utilização de sondas compatíveis - termopar do tipo K ¹.

Os equipamentos descritos permitem fazer a montagem da Figura 5.1, para a preparação das baterias e realização dos ensaios propostos na secções 5.1.4 e 5.2.1.

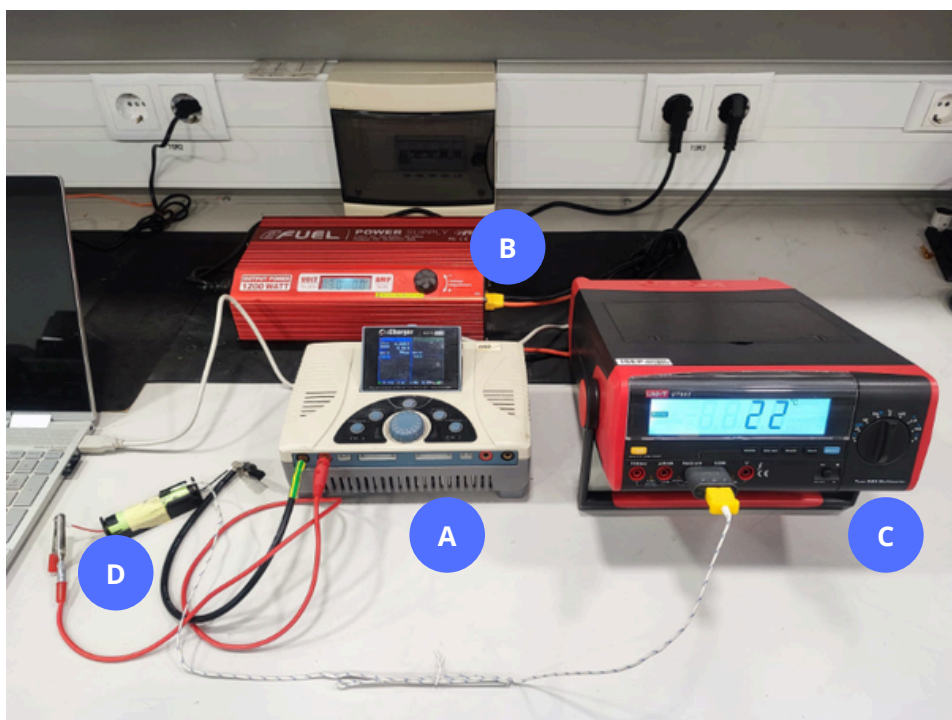


Figura 5.1: Montagem Experimental, com o (A) carregador (equivalente), (B) fonte, (C) multímetro e (D) bateria.

5.1.3 Baterias Submetidas a Ensaio

A seleção das baterias ensaiadas procurou abranger diferentes tecnologias, formatos e aplicações representativas do panorama atual de armazenamento de energia elétrica em veículos e sistemas auxiliares. Tal como listado na Tabela 5.2, foram incluídas células cilíndricas de iões de lítio de alta densidade energética, células *pouch* de iões de lítio com químicas *NMC+* e *LiHV*, bem como baterias de chumbo-ácido seladas (*AGM*) e baterias *LFP*, de modo a permitir uma análise comparativa entre tecnologias mais convencionais e soluções mais avançadas.

¹Um termopar é sensor de temperatura baseado no efeito *Seebeck*, que gera uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre duas junções metálicas. O tipo K, o mais comum, é composto por níquel-cromo e níquel-alumínio, sendo adequado para medições entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, com boa estabilidade e robustez em aplicações gerais.

Tabela 5.2: Quadro-resumo das baterias ensaiadas.
 (BAT 1: SANYO Electric Co.,Ltd 2015 | BAT 2: WELION Energy 2025
 | BAT 3: Sohu Auto 2025 | BAT 4: Exide Technologies s.d. | BAT 5:
 Fudeer Electric Appliance Co.,Ltd. s.d.; GR-KIROS Batteries s.d. | BAT 6:
 HobbyKing s.d.)

	Bateria (Célula)	Aplicação	Tensão e Capacidade	Tecnologia	Rendimento Esperado
1	Sanyo NCR18650GA	Tesla Model S/X	3.6 V 3.3 Ah	<i>NCA</i> (<i>Li-ion</i>)	~ 95%
2	SHP320-35	BEV Leves	3.65 V 35 Ah	<i>NMC+</i> (<i>Li-ion</i>)	~ 95%
3	HC85120GC1-20	BEV Leves	3.6 V 20 Ah	<i>NMC+</i> (<i>Li-ion</i>)	~ 95%
4	EXIDE ETZ14-BS	Sistemas SLI	12 V 11.2 Ah	<i>AGM</i> (Chumbo)	~ 70%
5	Fordeary FDE-Li-24-36-NL	Porta-Paletes Elétricos	12 V 36 Ah	<i>LFP</i> (<i>Li-ion</i>)	~ 95%
6	Turnigy Bolt 1800	Aeromodelismo e Drones	15.2 V 1.8 Ah	<i>LiHV</i> (<i>Li-Po</i>)	~ 90%

O critério de escolha considerou fatores como a relevância industrial, a disponibilidade comercial, a compatibilidade com os ensaios laboratoriais e a representatividade de aplicações reais, incluindo veículos elétricos de passageiros, veículos comerciais ligeiros, sistemas SLI automóveis e aplicações de aeromodelismo. Desta forma, é possível avaliar não apenas o comportamento elétrico e térmico de cada bateria, mas também a eficiência energética e a resistência a diferentes regimes de carga e descarga.

Esta abordagem permite construir um conjunto de dados abrangente, que serve como base para a análise de desempenho e comparações entre tecnologias, fornecendo informação detalhada não só para estudos de eficiência de carga/descarga, mas também tirar conclusões relativamente ao ciclo de vida, impacto da química e arquitetura das células nos parâmetros operacionais.

Bateria 1 - Sanyo NCR18650GA

As células cilíndricas no formato 18650 foram amplamente utilizadas pela Tesla nos primeiros modelos (Model S e Model X) como base para os módulos e packs de baterias. Para tal, este fabricante recorreu, em larga escala, a células produzidas pela Panasonic-Sanyo², com química de íões de lítio do tipo níquel-cobalto-alumínio (*NCA*). Embora os modelos exatos fornecidos à Tesla não sejam disponibilizados ao público, a célula NCR18650GA representa uma das versões comerciais mais próximas dessas células exclusivas. Trata-se de uma célula com capacidade de 3450 mAh, tensão de 3.6 V (valores nominais), e intervalo de operação entre 2.5–4.2 V. A elevada densidade de energia (693 Wh/L) e a boa capacidade de descarga a taxas moderadas tornam-na especialmente adequada para

²A Panasonic adquiriu a divisão de baterias da Sanyo em 2009, sendo comum a designação conjunta Panasonic-Sanyo em algumas referências técnicas.

aplicações de elevada densidade energética. Estas e outras características estão organizadas na Tabela 5.3 (Panasonic Corporation s.d.; SANYO Electric Co.,Ltd 2015).

Tabela 5.3: Principais Características da Bateria 1 (Panasonic Corporation s.d.; SANYO Electric Co.,Ltd 2015)

		NCR18650GA
Tensão	Nominal	3.60 V
	Máxima	4.20 V
	Mínima	2.50 V
Capacidade	Típica	3450 mAh
	Nominal	3350 mAh
	Mínima	3300 mAh
Energia Típica		12.42 Wh
Densidade Energética	Gravimétrica	224 Wh/kg
	Volumétrica	693 Wh/L
Temperatura	Carga	10–45 °C
	Descarga	–20–60 °C

A utilização da tecnologia 18650 pela Tesla demonstra como células originalmente concebidas para eletrónica portátil foram adaptadas ao setor automóvel. A NCR18650GA, apesar de não ser exatamente a célula usada nos veículos da marca, é considerada uma referência comercial equivalente e é estudada na literatura científica como representativa da base tecnológica das chamadas “Tesla 18650”.

Na presente investigação, a escolha da NCR18650GA justifica-se por essa proximidade tecnológica, permitindo realizar ensaios laboratoriais controlados (até 2 C) para analisar fenómenos de eficiência energética nesta variante de baterias de iões de lítio, quer em formato, quer em química.

Bateria 2 - SHP320-35

A bateria corresponde a células WELION da série SHP320. Estas células de estado semi-sólido apresentam-se no formato *pouch*, com química *NMC+*. Por este motivo, destacam-se por uma elevada densidade de energia, superior a 300 Wh/kg e 600 Wh/L (ver Tabela 5.4), tornando-as adequadas para aplicações em que o peso e o volume são críticos, como veículos elétricos leves e motocicletas de alto desempenho. Além disso, as células permitem taxas de descarga contínua até 7 C, com pulsos de até 10 C, o que é relevante para os ensaios de C-rates mais elevados, garantindo que a corrente aplicada durante os testes não excede as limitações da célula. Mantêm cerca de 80% da capacidade nominal após 800 ciclos a 97% de profundidade de descarga, assegurando fiabilidade em ensaios de múltiplos ciclos (WELION Energy 2025).

Segundo o fabricante, as células SHP320-35 foram concebidas para suportar condições extremas, incluindo sobrecarga, curto-circuito, temperatura elevada e deformação mecânica, o que garante segurança e robustez durante os testes laboratoriais. Estes parâmetros são particularmente importantes para o planeamento e execução dos ensaios de descarga a

diferentes C-rates, bem como para a monitorização de parâmetros elétricos e térmicos durante os ciclos de teste (WELION Energy 2025).

Tabela 5.4: Principais Características da Bateria 2 (WELION Energy 2025).

SHP320-35		
Tensão	Nominal	3.65 V
	Máxima	4.20 V
	Mínima	2.75 V
Capacidade Típica		35.0 Ah
Energia Típica		127.75 Wh
Densidade Energética	Gravimétrica	311 Wh/kg
	Volumétrica	713 Wh/L
Temperatura	Carga	0–45 °C
	Descarga	–20–55 °C

Bateria 3 - HC85120GC1-20

Tal como a Bateria 1 (WELION SHP320-35), a célula HC85120GC1-20, da empresa Huyuan³, é uma bateria de tipo semi-sólida desenvolvida para aplicações de alta performance. Destaca-se pela capacidade de operar a altas correntes, mantendo estabilidade térmica e segurança mesmo sob condições exigentes. A tecnologia semi-sólida permite maior robustez mecânica e melhor gestão térmica em comparação com células convencionais, contribuindo para maior durabilidade e consistência de desempenho ao longo do tempo (Sohu Auto 2025).

Em comparação com a célula SHP320-35, ambas partilham química *NMC+* e apresentam elevada densidade energética (Tabela 5.5), sendo adequadas para veículos elétricos leves e outras aplicações em que a relação entre volume, peso e energia é crítica. Enquanto a SHP320-35 é orientada para capacidades ligeiramente superiores (35 Ah *versus* 20 Ah), a HC85120GC1-20 distingue-se pelo equilíbrio entre desempenho em altas correntes e estabilidade térmica, tornando-a uma opção interessante para ensaios laboratoriais e estudos de eficiência energética. O ciclo de vida também é promissor, com até 1000 ciclos mantendo boa retenção de capacidade, assim como a sua elevada resistência, permitindo suportar condições extremas de operação, como sobrecarga, excesso de temperatura e curto-circuito (Sohu Auto 2025).

Bateria 4 - EXIDE ETZ14-BS

A bateria EXIDE ETZ14-BS é uma bateria de chumbo-ácido selada, projetada para aplicações em automóveis, especialmente em sistemas SLI em motos e veículos de pequena cilindrada. Destaca-se pela robustez e fiabilidade, sendo capaz de fornecer correntes elevadas de arranque mesmo após períodos de inatividade (Exide Technologies s.d.).

³Huyuan é um fabricante chinês de baterias especializado em tecnologias de íões de lítio, incluindo células semi-sólidas e de alta densidade energética.

Tabela 5.5: Principais Características da Bateria 3 (Sohu Auto 2025).

		HC85120GC1-20
Tensão	Nominal	3.58 V
	Máxima	4.35 V
	Mínima	2.80 V
Capacidade Típica		20.0 Ah
Energia Típica		71.6 Wh
Densidade Energética Gravimétrica		≈ 250 Wh/kg
Temperatura	Carga	0–55 °C
	Descarga	–40–60 °C

Como analisado anteriormente, tecnologia *AGM* (*Absorbent Glass Mat*) permite menor manutenção e maior resistência a vibrações, tornando a bateria adequada para ambientes exigentes. Comparada com baterias de íões de lítio de capacidades semelhantes, a ETZ14-BS apresenta menor densidade energética (ver Tabela 5.6), mas compensa com simplicidade, custo reduzido e durabilidade. Em aplicações práticas, a ETZ14-BS mostra excelente resistência a sobrecarga leve, sobredescarga e vibração, além de manter desempenho estável ao longo de vários ciclos (Exide Technologies s.d.).

Estas características tornam-na uma referência sólida para estudos comparativos entre tecnologias de armazenamento de energia elétrica, servindo como ponto de contraste com as restantes células, de íões de lítio. Para fins laboratoriais, esta bateria é particularmente interessante em ensaios de carga e descarga em faixa parcial de SoC, onde é possível estudar eficiência e comportamento térmico sem necessidade de controlo térmico rigoroso, dado que a dissipação de potência é relativamente baixa em correntes moderadas. A bateria ensaiada já apresenta desgaste prévio, estando próxima do fim da sua vida útil, pelo que são esperados resultados em linha de conta com este fator.

Tabela 5.6: Principais Características da Bateria 4 (Exide Technologies s.d.).

		ETZ14-BS
Tensão Nominal		12 V
Capacidade Típica		11.2 Ah
Energia Típica		132 Wh

Bateria 5 - Fordeary FDE-Li-24-36-NL

A bateria Fordeary FDE-Li-24-36-NL é uma bateria *LFP* de 24 V e 36 Ah (ver Tabela 5.7), projetada para alimentação do sistema de tração de porta-paletes e pequenos empilhadores elétricos. Apresenta elevada estabilidade química e térmica, além de longa vida útil, características típicas das células *LFP* (GR-KIROS Batteries s.d.).

A FDE-Li-24-36-NL destaca-se pela baixa resistência interna e robustez em ensaios de descarga a diferentes C-rates, oferecendo respostas consistentes e previsíveis. A química *LFP* confere-lhe uma excelente estabilidade durante ciclos repetidos, tornando-a adequada para

ensaios laboratoriais para medição de desempenho. Em comparação com outras baterias estudadas, como a EXIDE ETZ14-BS ou as células de íões de lítio SHP320-35, esta bateria combina densidade energética moderada com segurança térmica elevada, sendo ideal para testar configurações de carga/descarga parciais de forma controlada (Fudeer Electric Appliance Co.,Ltd. s.d.; GR-KIROS Batteries s.d.).

Nos ensaios conduzidos neste estudo, apenas metade da bateria (ou seja 12 V, 36 Ah) será utilizada, o que corresponde a apenas um dos dois dos módulos conectados em série. Esta abordagem permite avaliar o desempenho em termos de corrente, tensão e eficiência de carga/descarga, mantendo segurança e reduzindo a complexidade do sistema de monitorização. A bateria ensaiada não é nova, não apresentando, contudo, sinais de desgaste.

Tabela 5.7: Principais Características da Bateria 5 (Fudeer Electric Appliance Co.,Ltd. s.d.; GR-KIROS Batteries s.d.).

FDE-Li-24-36-NL		
	Nominal	24 V
Tensão	Máxima	29.2 V
	Mínima	20.8 V
Capacidade Típica		36.0 Ah
Energia Típica		864 Wh
Densidade Energética Gravimétrica		≈ 115 Wh/kg
Temperatura de Operação		5–40 °C

Bateria 6 - Turnigy Bolt 1800

As baterias Turnigy da série Bolt 1800 são baterias de $LiHV^4$ ($Li - Po$) projetada para aplicações em aeromodelismo e robótica. Na variante utilizada, apresentam 4 células *pouch* em série (4S), totalizando 15.2 V (ver Tabela 5.8). Estas baterias destacam-se pela densidade energética elevada e capacidade de fornecer correntes relativamente altas de forma consistente, permitindo ensaios de carga e descarga com C-rates variados (HobbyKing s.d.).

Tabela 5.8: Principais Características da Bateria 6 (HobbyKing s.d.).

Turnigy Bolt 1800		
Tensão	Nominal	15.2 V
	Máxima	17.4 V
Capacidade Típica		1800 mAh
Energia Típica		27.36 Wh

Esta bateria oferece desempenho previsível e confiável mesmo em ciclos repetidos, sendo adequada para medições laboratoriais de eficiência energética, resistência interna e comportamento de tensão sob diferentes cargas. A sua construção $Li - Po$ requer atenção à

⁴ $LiHV$ (Lithium High Voltage) refere-se a células de polímero de lítio melhoradas, capazes de suportar tensões de carga superiores às células convencionais, permitindo maior densidade energética e ligeiro aumento do desempenho em ciclos curtos ou moderados.

segurança, incluindo monitorização da tensão por célula e controlo de temperatura durante os ensaios. Em comparação com baterias de maior capacidade e química diferente, como a SHP320-35 ou a Fordeary FDE-Li-24-36-NL, a Turnigy Bolt 1800 destaca-se pela facilidade de manuseamento e modularidade. A menor capacidade torna-a ideal para estudos experimentais em que se pretende analisar diferentes condições de carga e descarga, devido à maior rapidez dos ensaios (HobbyKing s.d.).

À semelhança das duas baterias anteriores, esta unidade ensaiada é usada, podendo aqui apresentar algum sinal de desgaste.

5.1.4 Procedimento do Estudo e Ensaios Realizados

Os ensaios realizados no âmbito do Caso de Estudo #1 tiveram como principal objetivo a determinação do rendimento energético em diferentes condições de operação. Para tal, foram definidos perfis de carga e descarga que procuram reproduzir situações representativas da utilização de baterias em veículos eletrificados, nomeadamente variações na profundidade de descarga e na taxa de corrente aplicada.

A **metodologia experimental** adotada consistiu na realização de ciclos de carga e descarga entre 20 % e 80 % do estado de carga (SoC), a diferentes rácios C (ver Tabela 5.9).

Tabela 5.9: Lista de ensaios realizados - CASO DE ESTUDO #1

	Faixa SoC	Faixa Tensão	Rácios Carga/Descarga
BAT 1 Sanyo NCR18650GA	20 – 80%	3.4 – 3.95V	0.5C (1.7A)
			1.0C (3.3A)
			2.0C (6.6A)
BAT 2 SHP320-35	20 – 80%	3.5 – 3.95V	0.5C (17.5A)
			0.75C (26.3A)
BAT 3 HC85120GC1-20	20 – 80%	3.5 – 3.95V	0.5C (10A)
			1.0C (20A)
			1.5C (30A)
BAT 4 EXIDE ETZ14-BS	20 – 80%	12.0 – 12.66V (2.0 – 2.11V/célula)	0.2C (2.2A)
			0.5C (5.6A)
BAT 5 Fordeary FDE-Li-24-36-NL	20 – 80%	12.8 – 13.4V (3.2 – 3.35V/célula)	0.5C (18A)
			0.75C (27A)
BAT 6 Turnigy Bolt 1800	0 – 100%	12.8 – 17.0V (3.2 – 4.25V/célula)	0.5C (0.9A)
			1.0C (1.8A)
			2.0C (3.6A)
	20 – 80%	15.2V – 16.2V (3.8 – 4.05V/célula)	0.5C (0.9A)
			1.0C (1.8A)
			2.0C (3.6A)

A escolha da faixa 20–80 % justifica-se pelo facto de corresponder às práticas mais comuns da indústria automóvel no que respeita à gestão de baterias de tração, uma vez que a limitação das extremidades do intervalo de carga contribui para a redução do envelhecimento eletroquímico e, conseqüentemente, para a extensão da vida útil. Por outro lado, a utilização de diferentes C-rates permite simular cargas e descargas mais rápidas ou mais lentas, refletindo a diversidade de condições a que as baterias estão sujeitas em utilização real.

No caso da BAT6 (Turnigy Bolt 1800), foram ainda realizados ensaios adicionais de carga e descarga completa (0–100 % SoC), igualmente a diferentes C-rates. O objetivo consistiu em comparar os valores de rendimento obtidos em ciclos parciais com os observados em ciclos completos. A escolha desta bateria para os ensaios complementares deve-se à sua menor capacidade relativamente ao conjunto estudado, o que permitiu executar os testes de forma mais rápida e eficiente sem comprometer a representatividade dos resultados.

Dado que a larga maioria dos ensaios realizados correspondem a ciclos parciais, isto é, na faixa de 20–80 % SoC, foi necessário definir o início e o fim de ciclo com algum rigor, em função da tensão. No entanto, do leque de baterias testadas, apenas o fabricante da Bateria 1 especifica estes valores no respetivo *datasheet*; na ausência desta informação, foram **estimados com base em curvas típicas de cada tecnologia** (Apêndice C), os valores de tensão que correspondem ao estado de carga pretendido.

Para cada rácio definido, cada ciclo (par) de carga e descarga foi repetido três vezes, permitindo calcular o valor médio de energia correspondente.

Relativamente ao **procedimento de estudo**, foi adotado, em laboratório com ambiente controlado ($\approx 21\text{--}22^\circ\text{C}$), o seguinte protocolo experimental, para cada par de testes de carga e descarga:

● **PARTE A:**

- Retificação da tensão e balanceamento das células* da bateria para corresponder a 20 % SoC (se necessário);
- Carregamento da bateria no intervalo de 20–80 % SoC, segundo o método CC-CV e com acompanhamento de temperatura**;
- Repouso da bateria para estabilização.

● **PARTE B:**

- Retificação da tensão e balanceamento das células* da bateria para corresponder a 80 % SoC (se necessário);
- Descarregamento da bateria no intervalo de 80–20 % SoC, segundo o método CP-CV e com acompanhamento de temperatura**;
- Repouso da bateria para estabilização.

● **PARTE C:**

- Gravação em PC dos dados registados em cartão SD;
- Tratamento dos dados registados para cálculo da potência e energia carregada ou descarregada com posterior cálculo do rendimento;
- Análise da medição de temperatura, cálculo da amplitude térmica e gravação deste registo.

Observações:

* Em baterias equipadas com balanceador (BAT5 e BAT6), foi efetuado o balanceamento automático pelo dispositivo (iCharger DX12) e selecionado o respetivo modo (*Balance Only*) quando necessário, de forma a manter mínima a diferença de tensão entre as células.

** A sonda do termopar foi colocada sob a face de maior área da célula/bateria, no seu centro geométrico. No caso da BAT5, esta foi colocada na posição do sensor de temperatura original (ver Figura 5.2).



(a) Bateria 2



(b) Bateria 5

Figura 5.2: Posicionamento do termopar para controlo da temperatura: (a) no centro da face de maior área em comparação com (b) a posição do termopar original no módulo da Bateria 5

Parâmetro End Current - o que é e a sua importância

O parâmetro *End Current* no carregador iCharger DX12 define a corrente mínima a partir da qual o carregador considera que o processo de carga (ou descarga) se encontra concluído. Durante a fase de tensão constante (CV), a corrente de carga decresce gradualmente até valores residuais. O *End Current* atua como limite inferior dessa corrente: quando a corrente atinge o valor definido, a carga é terminada de forma automática. Este mecanismo previne sobrecarga, limita o tempo de exposição a correntes residuais pouco significativas e assegura consistência entre ensaios (iCharger 2023).

Desta forma, a escolha do *End Current* influencia diretamente a capacidade efetivamente carregada e a eficiência do processo: valores demasiado baixos prolongam desnecessariamente a fase CV, sem ganhos significativos de capacidade, enquanto valores demasiado elevados podem encurtar a carga (ou descarga) e subestimar a capacidade útil da bateria. Por este motivo, o *End Current* foi definido neste trabalho como uma fração da corrente de carga (C-rate), entre 1% e 2%, ajustado à tecnologia de cada bateria, tal como representado na tabela abaixo (Tabela 5.10).

Tabela 5.10: Valores de *End Current* para cada bateria ensaiada

Bateria	End Current
BAT1, BAT2, BAT3 e BAT5	2 %
BAT4 e BAT6	1 %

Acompanhamento de Temperatura

O acompanhamento da temperatura durante as cargas/descargas foi efetuado em todos os ensaios realizados, salvo nos seguintes casos:

- Na primeira vez de todos os ensaios, uma vez que estes serviram de controlo; e
- Nos ensaios da Bateria 1 a 0.5 C e nos ensaios da Bateria 4 (0.2 C e 0.5 C), uma vez que a temperatura destes ensaios não é mensurável, sabendo que:

A energia dissipada em cada instante é dada por:

$$Q = P_{\text{diss}} \cdot \Delta t = (I^2 \cdot R_{\text{int}}) \cdot \Delta t \quad (5.4)$$

onde:

- Q é a energia dissipada internamente (J)
- P_{diss} corresponde à potência dissipada internamente a cada instante (W)
- Δt corresponde ao intervalo de tempo considerado (1 h = 3600 s)
- I é a corrente elétrica máxima no C-rate ensaiado (A)
- R_{int} é a resistência interna da bateria nesse instante (Ω)

E que a variação da temperatura de um dado material é dada por:

$$\Delta T \approx \frac{Q}{m \cdot c_p} \quad (5.5)$$

onde:

- ΔT corresponde à variação (aumento) de temperatura ($^{\circ}\text{C}$ ⁵)
- m é a massa da bateria (kg)
- c_p é calor específico médio da bateria (J/kg · K)

Desta forma, para a Bateria 1 obtém-se que⁶:

$$Q = (1.7^2 \cdot 0.030) \cdot 3600 = 0.072 \cdot 3600 = 259.2 \text{ J}$$

$$\Delta T \approx \frac{259.2}{0.050 \cdot 830} \approx 6.2^{\circ}\text{C} \text{ (em 1 h)}$$

E para Bateria 4, de forma análoga e considerando o pior caso (0.5 C), obtém-se que⁷:

$$Q = (5.6^2 \cdot 0.020) \cdot 3600 = 0.627 \cdot 3600 = 2258 \text{ J}$$

$$\Delta T \approx \frac{2258}{4.10 \cdot 792} \approx 0.7^{\circ}\text{C} \text{ (em 1 h)}$$

⁵A variação de temperatura ΔT tem o mesmo valor em K e em $^{\circ}\text{C}$

⁶ $m = 0.050 \text{ kg}$; c_p (NCA) = 830 J/kg · K (BatteryDesign.net n.d.)

⁷ $m = 4.10 \text{ kg}$; $R_{\text{int}} \approx 20 \text{ m}\Omega$ (média de várias fontes); c_p (Pb) = 792 J/kg · K (BatteryDesign.net n.d.)

No entanto, considere-se também que:

- As variações de temperaturas calculadas referem-se à temperatura interna da célula, enquanto o termopar utilizado para logging estaria localizado na superfície exterior, que aquece menos do que o interior.
- O ensaio foi realizado num laboratório ventilado e climatizado, não adiabático, de modo que parte do calor gerado é dissipado para o ambiente por convecção e ventilação, reduzindo a temperatura efetiva da bateria.
- O multímetro utilizado para registo de temperatura apresenta resolução de apenas 1 °C, não permitindo detetar variações menores que a unidade.
- Os valores de corrente utilizados no cálculo representam o valor teórico máximo, que não se mantém constante durante todo o ensaio devido aos regimes CC-CV na carga e CP-CV na descarga. A corrente máxima ocorre apenas em picos curtos, não durante o ensaio completo.
- À semelhança dos valores de corrente, os valores de resistência interna considerados no cálculo foram selecionados de forma conservadora. Além disso, estes também não se verificam uniformemente durante todo o ciclo, dado que a resistência interna varia em função do estado de carga, da temperatura e da corrente aplicada. Assim, a estimativa tende a representar um cenário de dissipação superior ao que efetivamente ocorre.

Conclui-se assim que, embora a estimativa de ΔT interna possa ser considerável, o **aquecimento efetivo da superfície da bateria e a temperatura real durante o ensaio são significativamente menores**, justificando a **ausência de controlo térmico ativo** para estas condições experimentais. Em adição, seguindo as mesmas considerações, é esperado que a variação de temperatura nos restantes ensaios não seja muito elevada, principalmente nos ensaios realizados com correntes mais baixas.

Este conjunto de ensaios, nas condições indicadas, permite avaliar sobretudo a eficiência energética média de cada célula, mas também o seu comportamento sob diferentes intensidades de corrente, proporcionando ainda dados sobre a estabilidade térmica e as perdas internas em diferentes regimes de operação.

Com a realização destes ensaios é esperado obter valores de rendimento comparáveis aos encontrados na literatura. A proximidade entre os resultados experimentais e os valores de referência tende a ser maior para intensidades de corrente mais baixas, dado que, nestas condições, as perdas internas tendem a ser reduzidas ($P_{diss} = R_{int} \cdot I^2$ – Equação 5.4). Além disso, é igualmente expectável que, para o mesmo valor de C-rate (na mesma bateria), os ensaios a ciclos parciais (20–80 % SoC) apresentem rendimentos superiores (20–80 % SoC) quando comparado a ciclos completos (0–100 % SoC), em virtude da menor solitação eletroquímica associada às regiões extremas do estado de carga. É por este mesmo motivo que os fabricantes de baterias indicam que é conseguida uma maior vida útil se forem considerados os ciclos parciais.

5.2 CASO DE ESTUDO #2 - Avaliação da Capacidade Real de Baterias

A realização de testes de *capacidade real* das baterias, através de descargas completas a baixa taxa de corrente (tipicamente 0,2C), constitui um complemento fundamental aos ensaios de rendimento descritos no caso de estudo anterior. Este segundo caso de estudo tem como objetivo estabelecer uma **referência de capacidade máxima utilizável**, determinada em condições ideais de operação — isto é, com perdas resistivas mínimas e carga baixa a moderada — representando assim o limite teórico do desempenho energético da célula.

Enquanto os ensaios de rendimento se focaram na análise da eficiência e das perdas associadas a diferentes regimes de carga e descarga (como 0,5C, 1C ou 2C), neste estudo pretende-se avaliar a capacidade energética efetiva da bateria ao longo de um ciclo completo de descarga (100–0 % SoC), com uma corrente suficientemente baixa para minimizar as perdas internas.

Os resultados obtidos permitirão estabelecer uma base de comparação com os valores nominais ou típicos indicados pelo fabricante, bem como servir de referência quantitativa para avaliar o impacto das condições de operação nos testes de rendimento. Esta abordagem combinada permite quantificar o grau de penalização do desempenho em função do regime de uso e reforça a análise técnica do comportamento das baterias em diferentes contextos de aplicação.

Neste contexto, importa salientar que um resultado positivo nos ensaios de rendimento — com eficiências elevadas — não garante, por si só, um bom desempenho global da bateria. Caso a capacidade real medida seja significativamente inferior à indicada pelo fabricante, o rendimento deixa de ter impacto prático, já que a energia total disponível será limitada. Assim, a capacidade constitui um parâmetro crítico na avaliação de qualquer bateria, sendo esta análise indispensável para validar os dados fornecidos pelos fabricantes e garantir a adequação ao uso pretendido.

Este estudo tem então como objetivo avaliar a capacidade efetiva (real) das baterias testadas na faixa completa de carga (0–100 % SoC), em condições controladas de descarga, e compará-la com os valores de capacidade típica (em Ah e Wh) indicados pelos fabricantes.

5.2.1 Procedimento do Estudo e Ensaios Realizados

De modo a garantir os resultados pretendidos com este caso de estudo (#2), o procedimento original foi adaptado, mantendo os mesmos moldes:

- **PARTE A:**

- Retificação da tensão e balanceamento das células* da bateria para corresponder a 0 % SoC (se necessário);
- Carregamento da bateria a 0.2 C no intervalo de 0–100 % SoC, segundo o método CC-CV;
- Repouso da bateria para estabilização.

- **PARTE B:**

- Retificação da tensão e balanceamento das células* da bateria para corresponder a 100 % SoC (se necessário);

- Descarregamento da bateria a 0.2 C no intervalo de 100–0 % SoC, segundo o método CP-CV;
- Repouso da bateria para estabilização.

• **PARTE C:**

- Gravação em PC dos dados registados em cartão SD;
- Tratamento dos dados registados com posterior cálculo da energia total (Wh) fornecida na carga/descarga;

Observações:

* Em baterias equipadas com balanceador (BAT5 e BAT6), foi efetuado o balanceamento automático pelo dispositivo (iCharger DX12) e selecionado o respetivo modo (*Balance Only*) quando necessário, de forma a manter mínima a diferença de tensão entre as células.

Por sua vez, a amostra de baterias transitou também do caso de estudo anterior, tendo sido apenas retirada a Bateria 4, uma vez que os resultados poderiam ser distorcidos devido à sua vida útil já se ter extinguido. Assim sendo, o protocolo experimental foi aplicado às baterias identificadas como BAT1, BAT2, BAT3, BAT5 e BAT6, abrangendo diferentes tecnologias de iões de lítio (*NCA*, *NMC+*, *LFP* e *Li – Po*). Esta seleção assegura maior coerência na análise comparativa entre as tecnologias mais relevantes para aplicações em veículos eletrificados. Os ensaios realizados estão listados na Tabela 5.11; os C-rates escolhidos correspondem às especificações dos fabricantes.

Tabela 5.11: Lista de ensaios realizados - CASO DE ESTUDO #2

	Faixa Tensão	Rácio Carga/Descarga
BAT 1 Sanyo NCR18650GA	2.50–4.20 V	0.2C (0.7A)
BAT 2 SHP320-35	2.75–4.20 V	0.2C (7.0A)
BAT 3 HC85120GC1-20	2.80–4.35 V	0.2C (4.0A)
BAT 5 Fordeary FDE-Li-24-36-NL	10.4–12.6 V (2.60–3.60 V*)	0.2C (7.2A)
BAT 6 Turnigy Bolt 1800	12.8–17.0 V (3.20–4.20 V*)	0.2C (0.4A)

*valores de tensão por célula

Assim sendo, cada bateria foi submetida a ciclos completos de carga e descarga controlada, respeitando os limites de tensão recomendados pelo fabricante e as condições de segurança definidas.

5.2.2 Comparação e Avaliação de Resultados

Para avaliar o desvio entre a capacidade real medida experimentalmente e a capacidade anunciada pelo fabricante, foi calculada a percentagem de capacidade atingida, tanto em Ah (carga) como em Wh (energia).

A capacidade típica de cada bateria (tanto em Ah com em Wh) foi obtida a partir da respetiva ficha técnica do fabricante (*datasheet*). Este valor representa o desempenho esperado em condições ideais de ensaio, com corrente baixa (tipicamente 0.2 C a 0.5 C) e temperatura ambiente controlada (25°C).

No entanto, nem todos os *datasheets* das baterias testadas são completos, isto é, não possuem todas as informações relevantes para o seu estudo. Quando o valor nominal de energia (Wh) não é fornecido diretamente, foi calculado com base na seguinte expressão:

$$E_{\text{típica}} = C_{\text{típica}} \times V_{\text{nominal}} \quad (5.6)$$

onde:

- $E_{\text{típica}}$: Energia típica em Wh;
- $C_{\text{típica}}$: Capacidade típica em Ah;
- V_{nominal} : Tensão nominal em V.

Com base nos dados recolhidos com medições durante os ensaios experimentais, foi, para cada bateria, reunido o valor de capacidade acumulada (em mAh) e calculado a energia acumulada (em Wh). Para comparar os resultados obtidos com as especificações dos fabricantes foram determinadas as seguintes percentagens:

$$\% C = \left(\frac{C_{\text{medida}}}{C_{\text{típica}}} \right) \times 100 \quad \text{e} \quad \% E = \left(\frac{E_{\text{medida}}}{E_{\text{típica}}} \right) \times 100 \quad (5.7)$$

onde:

- C_{medida} : Capacidade efetiva medida (Ah);
- E_{medida} : Energia efetiva medida (Wh).

Este procedimento permite quantificar a proximidade dos valores obtidos face às especificações fornecidas pelos fabricantes, refletindo possíveis perdas por envelhecimento, variações de temperatura, ou diferenças nas condições de ensaio. Dadas as condições de realização do ensaio, próximas às utilizadas pelos fabricantes, é expectável que sejam obtidos valores de capacidade e energia muito próximos dos declarados nas fichas técnicas que, por sua vez, levam a percentagens (% C e % E) próximas de 100 %.

Capítulo 6

Análise dos Resultados Experimentais Obtidos e Eficiência Energética das Baterias Testadas

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos nos ensaios experimentais descritos no Capítulo 5. Os dados recolhidos permitem avaliar o rendimento energético das baterias em diferentes ciclos de carga e descarga, assim como a capacidade real nas condições ensaiadas.

A discussão é dividida em duas partes principais, primeiro os apresentam-se os Resultados Obtidos (6.1) e depois a Análise destes (6.2). Cada uma destas secções encontra-se subdividida em 2 pontos, correspondentes a cada Caso de Estudo (#1 e #2) definidos no capítulo anterior. Em cada ponto são apresentados os resultados obtidos e/ou cálculos realizados referentes ao seu tratamento, acompanhados da respetiva interpretação técnica e comparação com dados teóricos ou valores de referência, sempre que aplicável.

A análise final permite estabelecer relações entre os diferentes parâmetros de desempenho, com especial destaque para a influência da química da bateria, do regime de carga/descarga (C-rate) e da capacidade real, com vista a uma caracterização mais realista da eficiência de armazenamento em contexto de mobilidade elétrica.

6.1 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nas secções seguintes tem por base os ensaios realizados segundo os procedimentos experimentais definidos anteriormente (ver secção 5.1.4 e 5.2.1). Por meio do software *Junsi Console*, do fabricante do carregador iCharger DX12, é possível obter a curva representativa do ensaio realizado e, por sua vez, todas as variáveis guardadas a cada segundo. Todos os ensaios realizados estão representados pelas suas curvas nos Apêndices D a E, um para cada bateria. Com estes dados é então possível calcular os valores de energia para o cálculo do rendimento pretendido.

Na Figura 6.1 está ilustrada uma das curvas obtidas, em particular, num ensaio de descarga da Bateria 6.

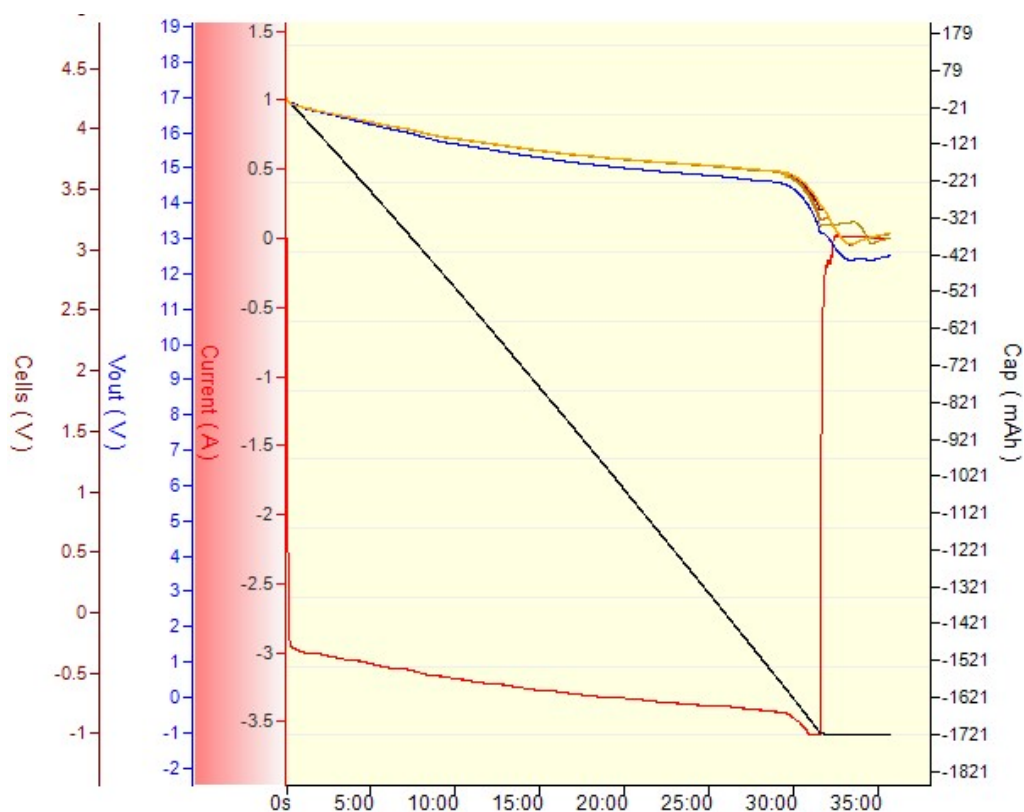


Figura 6.1: Curva obtida num ensaio de descarga da Bateria 6

Análise do Gráfico:

Eixos e grandezas representadas:

- Eixos verticais à esquerda:
 - Tensão Total da Bateria (Vout, a azul) - 17.2–12.8 V;
 - Corrente (Current, a vermelho) - até -3.6 A (ensaio com descarga até 2 C);
 - Tensão Individual de cada Célula (Cells, a verde) - 4.35–3.2 V.
- Eixo vertical à direita: capacidade acumulada - 1721 mAh.
- Eixo horizontal (inferior): tempo - até \approx 37 min.

Análise do Comportamento da Curva:

- Início (primeiros segundos):
 - A corrente desce rapidamente, para valores negativos, à semelhança da capacidade acumulada, indicando o início da descarga. A tensão começa a descer suavemente.
- Zona principal (1–30 min):
 - A tensão decresce de forma relativamente estável e quase linear: cai progressivamente de \approx 16.8 V (4.2 V/célula) para \approx 14.4 V (3.6 V/célula).

- A corrente decresce de forma também linear, em regime CP (potência constante) uma vez que as duas curvas são paralelas nesta secção.
- Fim da descarga (30–32 min):
 - Observa-se a queda mais abrupta da tensão, sinal de que a bateria atingiu o limite inferior de SoC ($\approx 0\%$); a corrente atinge o valor mínimo de -3.6 A (2 C).
- Término (32–37 min):
 - A corrente tende rapidamente a zero e o carregador corta a descarga, dando início ao balanceamento das células (curva plana de corrente em zero e da capacidade no valor mínimo);
 - A capacidade acumulada atinge o valor final (1721 mAh em valor absoluto).

6.1.1 CASO DE ESTUDO #1

Com os ensaios realizados no âmbito do Caso de Estudo #1, já descritos anteriormente, foi possível calcular a energia, em Wh envolvida em cada ensaio e, por sua vez, o valor médio dos 3 ensaios realizados em cada C-rate testado. Estes valores estão organizados na Tabela 6.1.

Deste conjunto de valores, que engloba os 108 ensaios realizados com sucesso deste Caso de Estudo, observa-se a elevada precisão, isto é, a proximidade relativamente à média, dos valores de energia obtidos:

- na Bateria 6, nos ensaios de descarga parcial a 0.5 C , 1.0 C e 2.0 C e em todos os ensaios completos (carga e descarga, 0–100 % SoC);
- na Bateria 2, nos ensaios parciais a 0.5 C (carga e descarga), assim como nos ensaios de carga a 0.75 C da mesma faixa de SoC;
- na Bateria 1, nos ensaios parciais a 2.0 C (carga e descarga), assim como nos ensaios de carga a 0.5 C da mesma faixa de SoC.

Em oposição, no outro prato da balança, de entre os valores de energia menos precisos, destacam-se os ensaios:

- da Bateria 3 e Bateria 4, de forma geral;
- da Bateria 6, nas cargas parciais (20–80 % SoC) a 1.0 C e 2.0 C .

Depois de calculado o valor médio de energia de cada ensaio, o passo seguinte é o tratamento destes resultados, com o cálculo dos valores de eficiência (rendimento) energética.

Por sua vez, na Tabela 6.2 estão registadas as variações de temperatura registadas nos ensaios efetuados. Note-se a ausência de valores nos ensaios a 0.5 C da Bateria 1, da coluna correspondente ao Ensaio 1, assim como das linhas referentes à Bateria 4, uma vez que não houve registo de temperatura neste conjunto de ensaios (ver secção 5.1.4).

Neste campo podem fazer-se também algumas observações: de todos os ensaios em que houve recolha de temperatura (num total de 60), em 75 % destes a variação de temperatura sentida foi inferior a $4\text{ }^\circ\text{C}$, sendo considerada não significativa; nos restantes 25 %, foram sentidas variações de temperatura até um máximo de $11\text{ }^\circ\text{C}$, nos ensaios de descarga completa a 2.0 C da Bateria 6, valor justificado pela maior quantidade de energia envolvida, com intensidade corrente superior aos restantes ensaios desta Bateria.

Tabela 6.1: Resultados Obtidos nos ensaios do CASO DE ESTUDO #1 - Energia registrada em cada ensaio e valor médio (MED) do rácio

Bateria	C-rate	Energia (Wh) do Ensaio					
		1	2	3	MED		
BAT 1	20-80 % CARGA	0.5C (1.7A)	7.6700	7.8479	7.8119	7.7766	
		1.0C (3.3A)	7.7112	7.6195	6.7626	7.3644	
		2.0C (6.6A)	7.7513	7.4685	7.2981	7.5059	
	DESCARGA	0.5C (1.7A)	6.5211	6.6217	7.8249	6.9893	
		1.0C (3.3A)	7.2416	6.6125	6.4714	6.7751	
		2.0C (6.6A)	6.6326	6.4734	6.3055 ^a	6.5530	
BAT 2	20-80 % CARGA	0.50C (17.5A)	53.834	53.491	53.171 ^a	53.499	
		0.75C (26.3A)	53.513	53.393	53.578	53.495	
	DESCARGA	0.50C (17.5A)	49.810	48.518	47.603	48.644	
		0.75C (26.3A)	51.644	49.412	48.730	49.928	
	BAT 3	20-80 % CARGA	0.5C (10A)	29.343	25.360	24.761	26.498
			1.0C (20A)	24.866	23.663	24.157	24.229
1.5C (30A)			23.135	24.730 ^a	20.717	22.861	
DESCARGA		0.5C (10A)	23.429	19.242	23.575	20.082	
		1.0C (20A)	21.824	20.263	22.586	21.558	
		1.5C (30A)	21.978	22.676	20.847	21.833	
BAT 4	20-80 % CARGA	0.2C (2.2A)	21.554	20.067	23.753	21.791	
		0.5C (5.6A)	25.054	23.154	25.185	24.464	
	DESCARGA	0.2C (2.2A)	22.782	18.683	20.754	20.740	
		0.5C (5.6A)	20.692	20.580	22.560	21.277	
BAT 5	20-80 % CARGA	0.50C (18A)	290.03	292.38	281.13	287.85	
		0.75C (27A)	281.71	283.90	287.61	284.41	
	DESCARGA	0.50C (18A)	265.47	249.81	252.18	255.82	
		0.75C (27A)	245.29	257.13	247.91	250.11	
BAT 6	20-80 % CARGA	0.5C (0.9A)	10.745	10.954	9.7621	10.487	
		1.0C (1.8A)	11.672	9.9516	10.470	10.698	
		2.0C (3.6A)	12.545	10.388	10.255	11.063	
		DESCARGA	0.5C (0.9A)	8.9940	9.0302	9.0566	9.0269
			1.0C (1.8A)	8.5407	8.6477	8.5057	8.5647
			2.0C (3.6A)	8.7050	8.6477	8.5057	8.5400
	0-100 % CARGA	0.5C (0.9A)	28.523	27.907	28.716	28.382	
		1.0C (1.8A)	27.782	27.585	27.114	27.493	
		2.0C (3.6A)	27.518	27.747	28.006	27.757	
		DESCARGA	0.5C (0.9A)	26.866	27.717	27.063	27.215
			1.0C (1.8A)	26.564	26.758	27.216	26.846
			2.0C (3.6A)	26.097	26.205	26.333	26.212

^a Ensaio realizado com carregador equivalente (iCharger 4010DUO) por questões de disponibilidade logística do laboratório.

Tabela 6.2: Variação de Temperatura (ΔT) registada nos ensaios do CASO DE ESTUDO #1

Bateria		C-rate	ΔT (°C) do Ensaio			
			2	3		
BAT 1	20-80 %	CARGA	0.5C (1.7A)	NR ^b	NR ^b	
			1.0C (3.3A)	3	3	
			2.0C (6.6A)	4	4	
	DESCARGA	0.5C (1.7A)	NR ^b	NR ^b		
		1.0C (3.3A)	4	5		
		2.0C (6.6A)	4	3		
BAT 2	20-80 %	CARGA	0.50C (17.5A)	3	4	
			0.75C (26.3A)	5	5	
			DESCARGA	0.50C (17.5A)	4	2
		0.75C (26.3A)	4	4		
	BAT 3	20-80 %	CARGA	0.5C (10A)	3	4
				1.0C (20A)	3	4
1.5C (30A)				4	3	
DESCARGA		0.5C (10A)	6	4		
		1.0C (20A)	4	4		
		1.5C (30A)	7	5		
BAT 4	20-80 %	CARGA	0.2C (2.2A)	NR ^b	NR ^b	
			0.5C (5.6A)	NR ^b	NR ^b	
			DESCARGA	0.2C (2.2A)	NR ^b	NR ^b
		0.5C (5.6A)	NR ^b	NR ^b		
	BAT 5	20-80 %	CARGA	0.50C (18A)	5	5
				0.75C (27A)	5	4
DESCARGA				0.50C (18A)	4	3
		0.75C (27A)	4	4		
BAT 6		20-80 %	CARGA	0.5C (0.9A)	3	3
				1.0C (1.8A)	4	5
	2.0C (3.6A)			4	4	
	DESCARGA		0.5C (0.9A)	6	4	
			1.0C (1.8A)	7	7	
			2.0C (3.6A)	11	11	
	0-100 %	CARGA	0.5C (0.9A)	3	2	
			1.0C (1.8A)	1	2	
			2.0C (3.6A)	4	3	
		DESCARGA	0.5C (0.9A)	2	2	
			1.0C (1.8A)	2	2	
			2.0C (3.6A)	2	2	

^b NR: Temperatura Não Registada

6.1.2 CASO DE ESTUDO #2

Com a execução do Caso de Estudo #2 foi também possível obter o valor acumulado de Energia (em Wh) de cada ensaio, aqui em ciclos completos a C-rates baixos (0.2 C). Estes valores foram também utilizados no cálculo do rendimento das baterias testadas, permitindo ter noção do comportamento das mesmas em condições distintas das anteriores.

Os valores obtidos com o Caso de Estudo #2 relativamente a este ponto estão organizados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Resultados Obtidos nos ensaios do CASO DE ESTUDO #2 - Energia registada em cada ensaio para cálculo de rendimento

	Bateria	C-rate	Energia (Wh) do Ensaio	
			1	
	BAT 1	0.2 C (0.7 A)	CARGA	13.811
			DESCARGA	12.909
	BAT 2	0.2 C (7.0 A)	CARGA	145.94
			DESCARGA	131.40
0-100 %	BAT 3	0.2 C (4.0 A)	CARGA	88.658
			DESCARGA	76.658
	BAT 5	0.2 C (7.2 A)	CARGA	474.85
			DESCARGA	451.77
	BAT 6	0.2 C (0.4 A)	CARGA	31.471
			DESCARGA	26.548

Relativamente a estes resultados, neste Caso de Estudo não é possível tecer grandes comparações uma vez que só foi realizado um ensaio para cada rácio C testado: para maior rigor científico, seria necessário realizar mais que um ensaio, o que também ajudaria a minimizar erros e garantia uma validação mais correta e assertiva dos resultados por comparação.

Entrando no objetivo do Caso de Estudo #2 propriamente dito, com a descarga lenta (a 0.2 C) das baterias testadas foram obtidos os valores de energia (em Wh) e de capacidade acumulada (em mAh) listados nos gráficos da Figura 6.2.

Aqui, com a ajuda da construção visual das barras dos gráficos é possível constatar a proximidade dos resultados obtidos com as especificações de cada bateria. Por sua vez, é também possível antever que sejam obtidos, na maioria dos casos, rácios de energia e capacidade atingida (ver Equações 5.7) superiores a 1 (100 %).

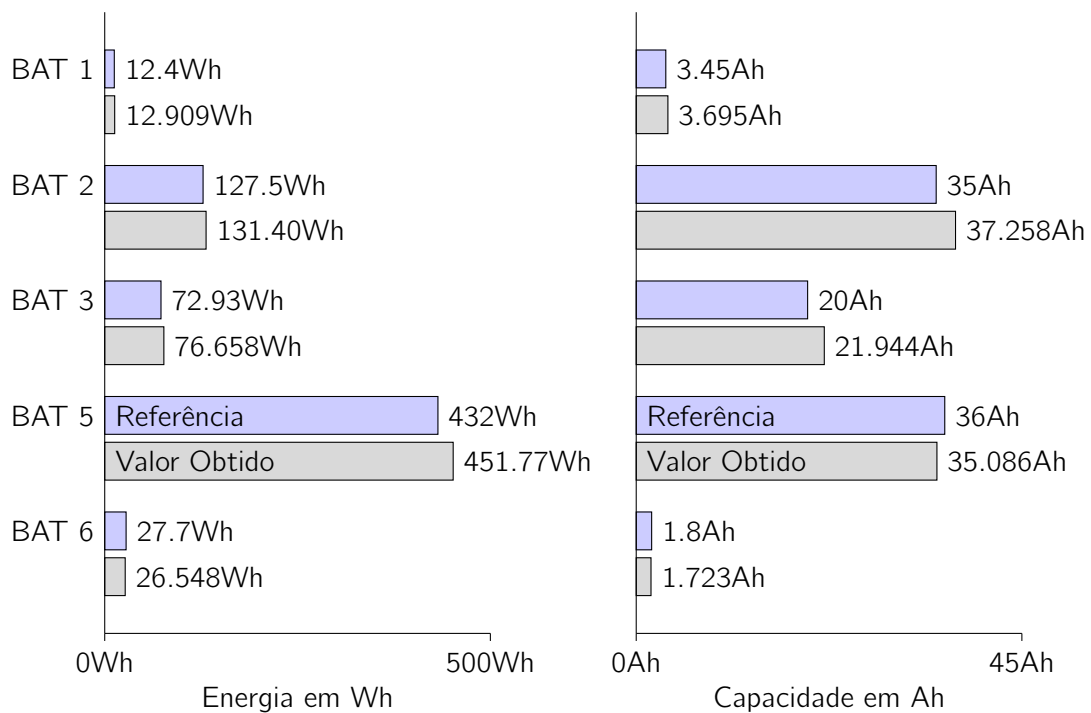


Figura 6.2: Resultados Obtidos nos ensaios do CASO DE ESTUDO #2 - Energia e Capacidade registada em cada ensaio em comparação com os valores de referência especificados pelos fabricantes.

6.2 Tratamento e Análise dos Resultados

6.2.1 CASO DE ESTUDO #1

Estando obtidos os valores médios de energia (em Wh) dos diferentes ensaios realizados, o passo seguinte é, como previamente referido, calcular o rendimento de carga e descarga em cada C-rate testado. Nas figuras seguintes (Figura 6.3 a 6.8) estão organizados graficamente estes mesmos valores, com presença do valor considerado como referência do rendimento para cada tecnologia de bateria.

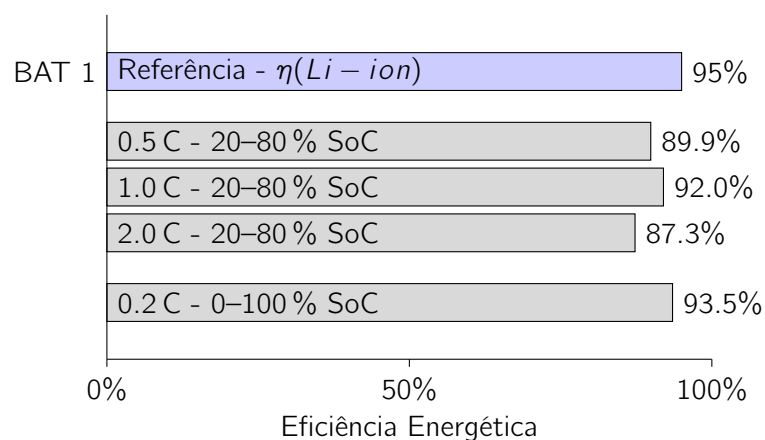


Figura 6.3: Eficiência - BAT 1. Referência de Hasan, Tom e Yuce 2023.

Relativamente aos resultados da Bateria 1, são obtidos valores de rendimento em linha de conta com o esperado; a eficiência energética a 0.2 C é muito próxima da referência considerada.

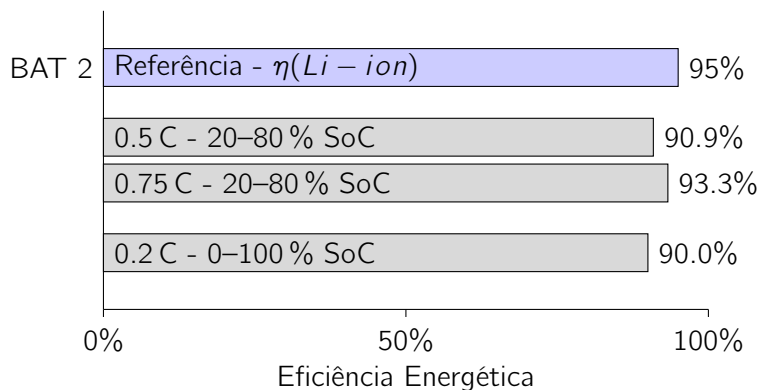


Figura 6.4: Eficiência - BAT 2.
Referência de Hasan, Tom e Yuce 2023.

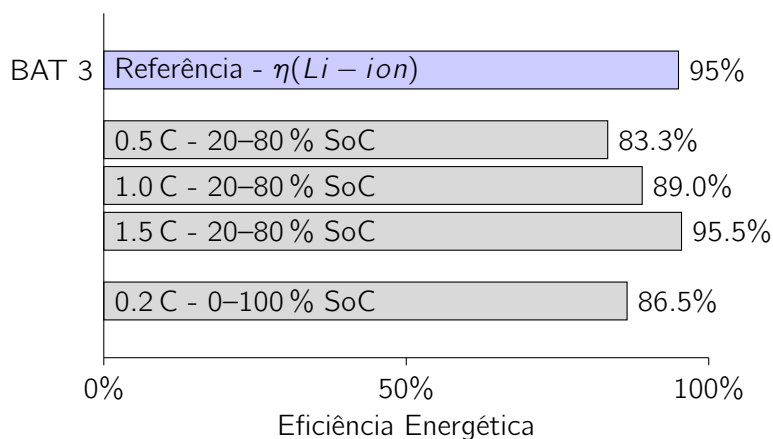


Figura 6.5: Eficiência - BAT 3.
Referência de Hasan, Tom e Yuce 2023.

Os resultados obtidos com os ensaios das Baterias 2 e 3 levantam algumas questões ao colidirem com os pressupostos teóricos: verificam-se rendimentos obtidos superiores em rácios C mais elevados ao invés de em rácios C inferiores, onde, com o aumento da intensidade de corrente aumenta a dissipação de energia (potência dissipada). Noutra perspetiva, os resultados da Bateria 3 (com exceção do rendimento a 1.5 C) ficam bastante aquém do esperado, com uma diferença em torno dos 10 % face à referência.

Os valores de rendimento obtidos nos ensaios da Bateria 4 podem também ser encarados com alguma surpresa, considerado que a mesma se encontra com desgaste avançado e em fim de vida útil, já que são muito próximos do dado de referência. Estes valores sugerem, ainda que sem certezas, que o fator «desgaste» não afeta a eficiência energética. Neste sentido, é proposta uma investigação futura sobre este ponto, com a realização de ensaios com baterias novas vs. baterias usadas, de igual referência, para estudar o impacto do desgaste no rendimento de uma bateria.

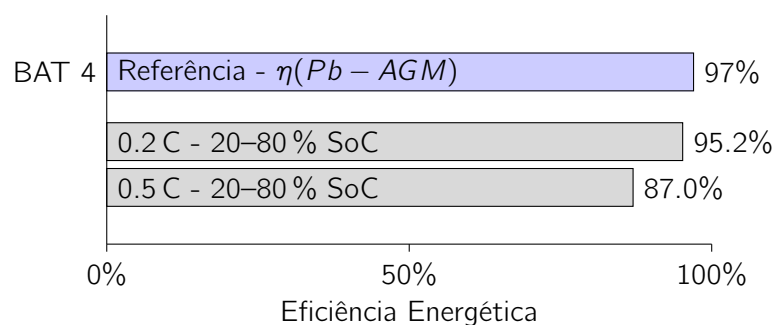


Figura 6.6: Eficiência - BAT 4.
Referência de Buchmann 2017.

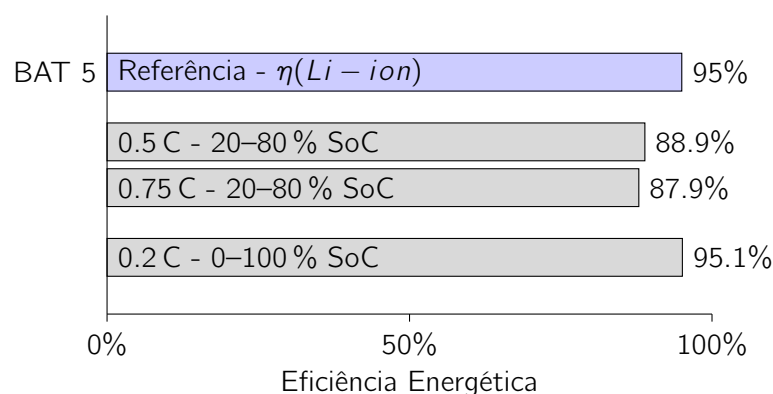


Figura 6.7: Eficiência - BAT 5.
Referência de Hasan, Tom e Yuce 2023.

À semelhança dos resultados obtidos nos ensaios da Bateria 1, também os valores de rendimento da Bateria 5 são o esperado: rendimento decresce com o aumento da intensidade de corrente, devido ao aumento das perdas por dissipação. Destaque-se ainda a eficiência energética resultante dos ensaios ao rácio de 0.2 C, que é coincidente com o valor de referência.

Os resultados obtidos com os ensaios da Bateria 6 são entendidos com uma certa ambiguidade. Por um lado, nos ensaios parciais, verificam-se os pressupostos teóricos em que quanto maior a intensidade de corrente, menor é o rendimento devido às perdas de energia por efeito Joule (a maior variação de temperatura foi atingida nos ensaios a 2.0 C). Por outro lado, são obtidos menores valores de eficiência energética nos ciclos parciais, que não contam com os extremos da faixa de SoC sujeitos a maior atividade eletroquímica, ficando aquém da referência.

Analisando os ciclos completos desta bateria de forma isolada, é ainda possível observar a superioridade do rendimento obtido nos ensaios a 0.5 C, 1.0 C e 2.0 C face ao valor de referência. No entanto, em teoria, estes valores obtidos deveriam ser inferiores ao obtido no ensaio a 0.2 C, o que não se verifica.

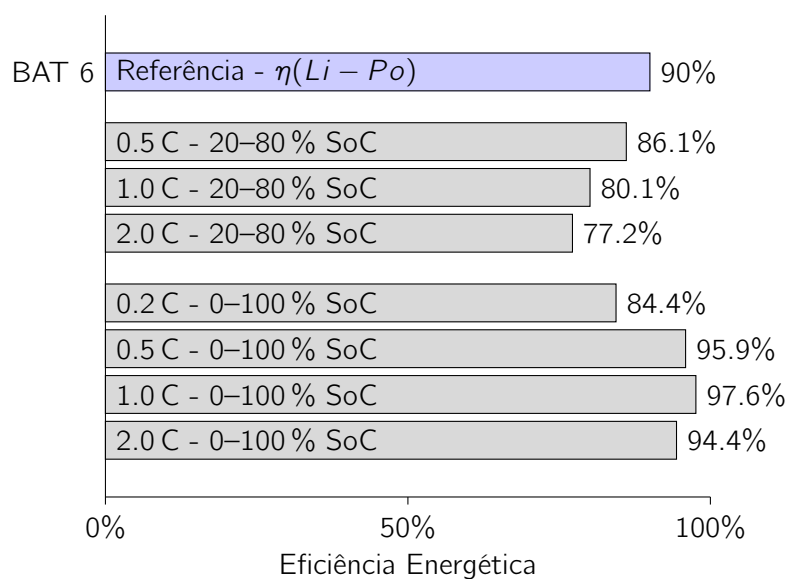


Figura 6.8: Eficiência - BAT 6.
Referência de Hasan, Tom e Yuze 2023.

Por fim, com base nos rácios de eficiência determinados em cada ciclo de carga e descarga para cada C-rate, foi possível calcular o rendimento energético global de cada bateria, obtido pela média dos rendimentos parciais. Os resultados finais encontram-se organizados por faixa de SoC e representados na Figura 6.9, incluindo igualmente o valor de rendimento global calculado para cada bateria.

A análise deste gráfico evidencia que os valores de eficiência medidos são, por sistema, inferiores às referências encontradas na literatura, o que confirma a diferença entre condies laboratoriais ideais e a operao em regime real.

Observa-se que, uma parte das baterias testadas (BAT 2 e BAT 3, de *NMC+*), a utilizao restrita  janela de 20–80 % de SoC resulta em maior eficiência face  operao em ciclo completo (0–100 %). Este comportamento encontra suporte na literatura, que associa os extremos de SoC a maior resistência interna e a perdas adicionais por atividade eletroquímica e polarizao.

No caso da Bateria 1 e da Bateria 5, a maior eficiência energética foi obtida, de forma ligeira, nos ensaios de ciclo completo. Nestas situaes, a menor intensidade de corrente (ensaios a 0.2 C) superou os efeitos dos extremos do estado de carga.

A BAT 6 constitui uma exceo, apresentando um comportamento distinto. Aqui, a eficiência foi muito superior em ciclo completo, com 95.2 % do que na faixa parcial (81.6 %), resultando numa diferença de 13.6 %. Este resultado pode estar relacionado com as características da sua química (*Li - Po - LiHV*), que mantém baixa resistência interna até níveis de tensão próximos do carregamento máximo, proporcionando menores perdas em operao a plena carga.

Em último caso, considerando a BAT 4, que não teve ensaios realizados na faixa 0–100 % de SoC, observa-se um bom desempenho energético e proximidade face ao valor de referência, apesar de se encontrar em fim de vida.

De forma geral, as eficiências globais calculadas situam-se entre os 88 % (BAT 3 e BAT 6) até o máximo de 91.4 % na Bateria 2, destacando-se a Bateria 3 como a menos eficiente do conjunto e a Bateria 4 que, apesar do seu desgaste, apresenta valores próximos da referência (diferença de cerca de 6 %). Estes resultados reforçam a relevância da definição da janela operacional de SoC em função da tecnologia como fator determinante para a otimização da eficiência energética e demonstram que, em condições reais de utilização, o desempenho das baterias pode divergir de forma significativa relativamente aos valores de catálogo.

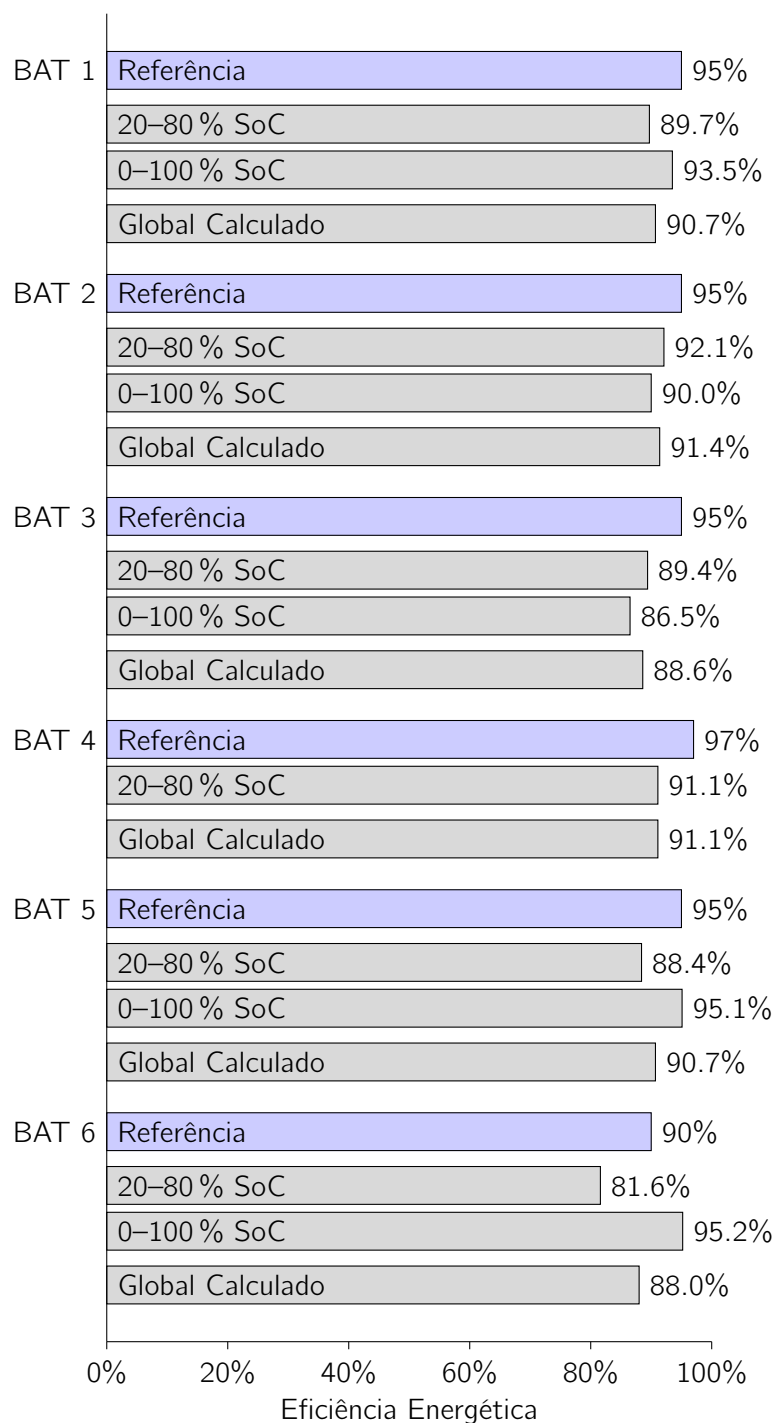


Figura 6.9: Eficiência Global das Baterias Testadas por faixa de SoC

6.2.2 CASO DE ESTUDO #2

Relativamente aos resultados obtidos com o Caso de Estudo #2, foram atingidos valores muito próximos das especificações dos fabricantes, ainda que ligeiramente superiores (em todas as Baterias com exceção da Bateria 6), estando estes representados no gráfico da Figura 6.10. Tal facto poder dever-se a um de dois fatores: (a) ou, por um lado, os fabricantes são conservadores nos dados que apresentam, considerando situações «médias» de utilização ao invés de condições com resistência interna mínima; ou (b) o excesso de energia e capacidade em comparação com os valores declarados deve-se a erros cometidos de forma involuntária durante os ensaios.

De qualquer das formas, quer por um motivo, pelo outro, ou até mesmo pela sobreposição dos dois, para consolidar estas conclusões deveria ter sido realizados mais ensaios.

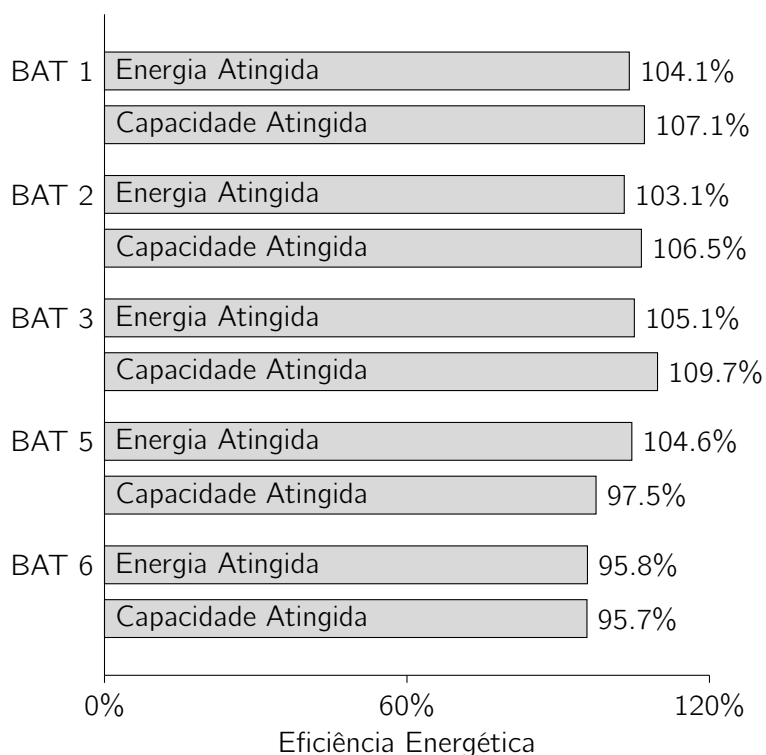


Figura 6.10: Energia e Capacidade Real das Baterias Testadas

Capítulo 7

Notas Finais

7.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo central a avaliação do rendimento de ciclos de carga e descarga em diferentes tecnologias de baterias aplicadas ao setor automóvel. A motivação surgiu do interesse em clarificar informações muitas vezes difusas ou incompletas sobre o desempenho real destes sistemas, contribuindo para uma compreensão mais rigorosa dos fatores que influenciam a eficiência energética de veículos eletrificados.

A **revisão do estado da arte** permitiu sistematizar os principais conceitos relativos a veículos eletrificados, tipologias de baterias e respetivas características de operação. Relativamente às baterias mais utilizadas, a tecnologia de iões de lítio é atualmente dominante para veículos elétricos e híbridos devido à sua alta densidade energética e longa vida útil. No entanto, novas tecnologias, como baterias de estado sólido, estão em desenvolvimento e prometem melhorias significativas.

O rendimento das baterias é afetado por diversos fatores, incluindo temperatura, estratégias de carga/descarga e balanceamento das células. A gestão térmica e o controlo preciso dos ciclos são cruciais para otimizar a eficiência e a vida útil das baterias. Ademais, uma gestão térmica adequada é essencial para prevenir problemas como o *thermal runaway* e para manter o desempenho ótimo das baterias em diferentes condições climáticas. As estratégias de carregamento rápido, embora convenientes, podem ter impactos negativos na longevidade da bateria se não forem adequadamente geridas: o equilíbrio entre velocidade de carregamento e preservação da bateria é um desafio contínuo. Ficou demonstrado que a eficiência de um sistema de armazenamento tem ainda influência por fatores como a resistência interna, o estado de carga (SoC), a profundidade de descarga (DoD) e a taxa de carga/descarga (C-rate).

Nos **ensaios experimentais realizados**, foram testadas seis baterias de diferentes tecnologias e formatos, com aplicação possível na indústria automóvel e mobilidade, desde células cilíndricas de iões de lítio (Bateria 1), tecnologias emergentes (Bateria 2 e 3), módulos de maior capacidade (Bateria 5), passando por uma bateria de chumbo-ácido (do tipo *AGM*, Bateria 4) e polímero de lítio (Bateria 6). O Caso de Estudo #1 permitiu quantificar o rendimento energético dos ciclos de carga/descarga em diferentes condições, comparando com valores de referência enquanto que, em paralelo, o Caso de Estudo #2 avaliou a capacidade real disponível em comparação com os valores nominais fornecidos pelos fabricantes.

Foram realizados um total de 118 ensaios com sucesso, traduzindo-se em cerca de 430 horas de medições e registos. Em cerca de metade deste ensaios (em 60, do Caso de Estudo #1) foi realizado o acompanhamento do ponto de vista térmico, onde a variação de temperatura

máxima registada atingiu os 11 °C, numa descarga da Bateria 6, de *Li – Po*, a tecnologia testada mais suscetível à influência de temperatura.

Em relação aos resultados de energia obtidos com o **Caso de Estudo #1**, verificam-se algumas disparidades nos valores, com vários ensaios a apresentar valores sem precisão. Do ponto de vista do rendimento, a análise dos resultados mostra que a eficiência energética das baterias depende fortemente da tecnologia e da faixa de SoC utilizada.

Para as BAT 2 e BAT 3 (*NMC+*), a operação restrita à janela 20–80 % de SoC proporcionou maior eficiência do que em ciclo completo (0–100 %), em linha com a literatura, que indica maior resistência interna e perdas adicionais nos extremos de SoC. Por sua vez, no caso da BAT 1 (*NCA*) e da BAT 5 (*LFP*), a eficiência foi ligeiramente superior em ciclo completo, resultado da menor intensidade de corrente nos ensaios (0.2 C), que mitigou os efeitos dos extremos de carga.

Já a BAT 6 apresentou comportamento distinto, com eficiência significativamente maior em ciclo completo (95.2 %) do que na faixa parcial (81.6 %). Este desempenho pode ser explicado pela sua química (variante *LiHV* de *Li – Po*), que mantém baixa resistência interna até tensões próximas da carga máxima, reduzindo as perdas em plena carga.

A BAT 4 (*AGM*), embora apenas ensaiada na faixa parcial, apresentou desempenho energético próximo do valor de referência, mesmo em fim de vida.

De forma geral, as eficiências globais variaram entre 88 % (BAT 3 e BAT 6) e 91.4 % (BAT 2), destacando a BAT 3 como a menos eficiente e a BAT 4 como próxima do valor de referência, apesar do desgaste. Estes resultados sublinham a relevância de definir janelas operacionais de SoC adequadas à tecnologia da bateria para otimizar a eficiência energética, demonstrando que, em condições reais de utilização, o desempenho pode diferir significativamente dos valores de catálogo.

Relativamente aos ensaios resultantes da execução do **Caso de Estudo #2**, é não possível desenvolver muitas conclusões uma vez que só foi realizado um ensaio para cada rácio C testado. No entanto, é possível constatar a proximidade dos resultados obtidos com as especificações de cada bateria, onde, na maioria dos casos, os rácios de energia e capacidade atingida são superiores superiores a 1 (100 %). Para maior rigor científico, seria necessário realizar mais que um ensaio, o que também ajudaria a minimizar erros e, por comparação, garantia uma validação mais correta e assertiva dos resultados.

É importante realçar que a eficiência global de baterias medida/calculada neste estudo inclui apenas as perdas internas da célula, e não contabiliza as perdas associadas ao sistema de gestão da bateria (BMS), conversores de potência e cablagem. Assim, o valor real de eficiência energética útil é expectável ser inferior ao estimado nestes testes.

De forma global, a dissertação demonstrou que o estudo do rendimento de carga e descarga das baterias é fundamental não apenas para a correta avaliação da autonomia e do desempenho de veículos eletrificados, mas também para o dimensionamento adequado dos sistemas de armazenamento de energia, garantindo que estes operem de forma eficiente e segura. Adicionalmente, a análise detalhada do comportamento energético contribui para a credibilização das informações disponibilizadas ao consumidor, permitindo decisões mais informadas sobre utilização, manutenção e expectativas reais de desempenho. Assim, a compreensão precisa de toda a temática do rendimento das baterias revela-se um elemento central tanto na conceção e otimização de sistemas elétricos como na confiança e transparência face aos utilizadores finais.

7.2 Limitações

Apesar de todos os contributos alcançados, importa reconhecer algumas limitações do presente trabalho:

- A existência de apenas uma ponta de prova de temperatura (termopar) causou uma limitação dado que não permitiu a realização de mais ensaios. Com a possibilidade de realizar mais que uma medição de temperatura a cada vez, era permitido realizar mais ensaios (diferentes taxas e/ou mais baterias) no mesmo tempo;
- Amostra restrita de baterias: foram testadas apenas seis baterias, de tecnologias e fabricantes diferentes, o que não permite extrapolar conclusões universais sobre todas as tecnologias ou fabricantes;
- Restrições de equipamento: o sistema de ensaio apresenta limites de corrente e potência, impossibilitando a realização de testes em condições extremas de operação;
- Escopo temporal limitado: não foram estudados fenómenos de envelhecimento em ciclos prolongados nem a auto descarga em repouso, fatores determinantes para a avaliação da durabilidade e fiabilidade em aplicações reais;
- Condições ambientais controladas: os ensaios foram realizados em ambiente ventilado e a temperatura ambiente, não sendo considerada a influência de variações térmicas ou de pressão atmosférica que ocorrem em cenários reais de utilização.

7.3 Trabalhos Futuros

Dando continuidade a este estudo, sugerem-se as seguintes linhas de investigação:

- Retificação dos valores obtidos: refazer os ensaios que originaram em resultados sem precisão, de modo a calcular com mais rigor e fiabilidade a eficiência energética das baterias testadas;
- Alargamento da amostra: ensaiar um número superior de baterias de diferentes tecnologias, capacidades e fabricantes, incluindo células utilizadas em veículos, assim como testes de células novas vs. usadas, para avaliar de que forma o envelhecimento afeta o rendimento energético;
- Ensaios de auto-descarga: quantificar a perda de capacidade em repouso, analisando a sua relação com o estado de carga inicial e com a temperatura ambiente;
- Testes de utilização intensiva, quer a correntes elevadas quer em duração do ciclo (ciclos completos - 0-100% SoC);
- Estudos de envelhecimento cíclico: realizar ensaios de longa duração para avaliar a degradação de capacidade e a evolução da resistência interna ao longo de centenas ou milhares de ciclos;
- Influência da temperatura e pressão: desenvolver testes em câmaras climáticas e barométricas para compreender o comportamento das baterias em condições extremas de utilização;
- Integração com sistemas BMS: investigar a forma como os algoritmos de gestão influenciam a eficiência global e a segurança dos sistemas de armazenamento.

Bibliografia

- Abbas, Mazhar et al. (2016). «Comparative Analysis of Battery Behavior with Different Modes of Discharge for Optimal Capacity Sizing and BMS Operation». Em: *Energies* 9.10. issn: 1996-1073. doi: <https://doi.org/10.3390/en9100812>. url: <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/10/812>.
- ACEA, European Automobile Manufacturers Association (fev. de 2019). *NEW PASSENGER CAR REGISTRATIONS BY FUEL TYPE IN THE EUROPEAN UNION - Quarter 4 2018*. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14582094>.
- (jan. de 2024). *NEW CAR REGISTRATIONS, EUROPEAN UNION 2023*. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14582070>.
- Albatayneh, Aiman et al. (2020). «Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles». Em: *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti* 24.1, pp. 669–680. doi: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0041>.
- Amer, Mohammed et al. (2024). «Electric vehicles: Battery technologies, charging standards, AI communications, challenges, and future directions». Em: *Energy Conversion and Management: X*, p. 100751. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100751>.
- Asif Afzal A. D. Mohammed Samee, R. K. Abdul Razak e M. K. Ramis (2021). «Thermal management of modern electric vehicle battery systems (MEVBS)». Em: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 144, pp. 1271–1285. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09606-x>.
- Automóvel Club de Portugal (nov. de 2022). *Carregamento rápido vs carregamento normal*. Acedido a 20 de novembro de 2024. ACP. url: <https://www.acp.pt/eletricos/carregar-carro-eletrico/carregamento-rapido-vs-carregamento-normal>.
- Banguero, Edison et al. (2018). «A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems». Em: *Energies* 11.4. doi: <https://doi.org/10.3390/en11041021>.
- Baronti, Federico et al. (2014). «Investigation of series-parallel connections of multi-module batteries for electrified vehicles». Em: *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*. IEEE, pp. 1–7.
- Battery Equivalents (2024). *AGM Battery Voltage Chart*. <https://www.batteryequivalents.com/agm-battery-voltage-chart.html>. Acedido a 2 de Agosto de 2025.
- BatteryDesign.net (n.d.). *Thermal*. Acedido a 18 de agosto de 2025. url: <https://www.batterydesign.net/thermal/>.
- Beard, Kirby W. (2019). *Linden's Handbook of Batteries, 5th Edition*. McGraw Hill. isbn: 978-1260115925.
- Bird, John (2017). *Electrical and Electronic Principles and Technology*. 6th Edition. Routledge. isbn: 9781315561875. doi: <https://doi.org/10.4324/9781315561875>.
- BMW de México, S.A. de C.V. (dez. de 2024). *BMW i3s REX Sport 2019*. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14531220>.

- Buchmann, Isidor (2017). *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*. 4^a ed. Vancouver, Canada: Cadex Electronics Inc. isbn: 978-0968211847. url: <https://batteryuniversity.com/>.
- Caetano Retail (2024). *Os 7 híbridos plug-in com maior autonomia de 2024*. Acedido a 12 de dezembro de 2024. url: <https://caetanoretail.pt/blog/hibridos-plug-in-maior-autonomia/>.
- Dell, Ronald M., Patrick T. Moseley e David A.J. Rand (2014). «Chapter 5 - Progressive Electrification of Road Vehicles». Em: *Towards Sustainable Road Transport*. Ed. por Ronald M. Dell, Patrick T. Moseley e David A.J. Rand. Boston: Academic Press, pp. 157–192. isbn: 978-0-12-404616-0. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404616-0.00005-0>.
- Deng, Jie et al. (2020). «Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges». Em: *Joule* 4.3, pp. 511–515. issn: 2542-4351. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.01.013>.
- Denton, Tom (2018). *Alternative fuel vehicles*. Routledge (Taylor & Francis Group), Oxon. isbn: 978-1-138-50370-0.
- (2020). *Electric and hybrid vehicles*. Routledge (Taylor & Francis Group), Oxon. isbn: 978-0-367-27324-8.
- EU (set. de 2017). *Commission Delegated Regulation (EU) 2017/1576 of 26 June 2017 amending Regulation (EU) No 540/2014 of the European Parliament and of the Council as regards the Acoustic Vehicle Alerting System requirements for vehicle EU-type approval (Text with EEA relevance.)*
- Exide Technologies (s.d.). *Exide ETZ14-BS Motorcycle Battery*. Acedido a 16 de agosto de 2025. url: <https://www.exidegroup.com/eu/en/battery/ETZ14-BS>.
- Feng, Xuning et al. (2018). «Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review». Em: *Energy Storage Materials* 10, pp. 246–267. issn: 2405-8297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013>.
- Fudeer Electric Appliance Co.,Ltd. (s.d.). *Power Battery Solution*. Acedido a 16 de agosto de 2025. url: <https://www.fudeerltd.com/powerbatterysolution>.
- Ham, Chang-Dae, Heyhyun Hong e Glen Cameron (jan. de 2012). «Same Crisis, Different Responses: Case Studies of How Multiple Competing Corporations Responded to the Same Explosion-Related Crises». Em: *International Journal of Business and Social Science* 3, pp. 19–31.
- Hasan, Kareeb, Neil Tom e Mehmet Rasit Yuce (2023). «Navigating Battery Choices in IoT: An Extensive Survey of Technologies and Their Applications». Em: *Batteries* 9.12. doi: <https://doi.org/10.3390/batteries9120580>.
- HobbyKing (s.d.). *Turnigy Bolt 1800mAh 4S 15.2V 65 130C High Voltage LiPo Pack (LiHV)*. Acedido a 16 de agosto de 2025. url: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-bolt-1800mah-4s-15-2v-65-130c-high-voltage-lipoly-pack-lihv.html.
- Holze, Rudolf (set. de 2022). «Self-discharge of Batteries: Causes, Mechanisms and Remedies». Em: *Advanced Materials Science and Technology* 4, pp. 32–47. doi: <https://doi.org/10.37155/2717-526X-0402-3>.
- iCharger (2023). *DX12 User's Manual (V1.0.3)*. Versão 1.0.3. url: <https://www.icharger.eu/icharger-dx12-dual-battery-charger-1700w-50a-lipo-2x12s-p-749.html>.
- (s.d.). *iCharger DX12 Dual Battery Charger 1700W 50A LiPo 2x12S*. Acedido a 16 de junho de 2025. url: <https://www.icharger.eu/icharger-dx12-dual-battery-charger-1700w-50a-lipo-2x12s-p-749.html>.

- Islameka, Metha et al. (2023). «Energy management systems for battery electric vehicles». Em: *Emerging Trends in Energy Storage Systems and Industrial Applications*. Elsevier, pp. 113–150. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90521-3.00006-5>.
- Jaguemont, J., L. Boulon e Y. Dubé (2016). «A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures». Em: *Applied Energy* 164, pp. 99–114. issn: 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034>.
- James Larminie, John Lowry (2012). *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons, Ltd. isbn: 9781118361146. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118361146>.
- GR-KIROS Batteries (s.d.). *FORDEARY FDE-Li-24-36-NL 24V 36AH LITHIUM-ION TECHNOLOGY BATTERY FOR ELECTRIC PALLET TRUCKS*. Acedido a 16 de agosto de 2025. url: https://shop.grkbatteries.gr/FORDEARY_FDE-Li-24-36-NL_24V36AH.
- Kitaronka, Sefu (2022). «Lead-acid battery». Em: *no. January*. doi: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19115057>.
- Koraddi, Shweta et al. (2022). «Analysis of Different Cell Balancing Techniques». Em: *2022 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, pp. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1109/ICONAT53423.2022.9725863>.
- Lee, Youngchul, Seonwoo Jeon e Sungwoo Bae (mai. de 2016). «Comparison on Cell Balancing Methods for Energy Storage Applications». Em: *Indian Journal of Science and Technology* 9. doi: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i17/92316>.
- Li, Jiawei et al. (abr. de 2019). «Improved electrochemical performance of cathode material LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ by doping magnesium via co-precipitation method». Em: *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 30. doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01062-0>.
- Liu, Kai et al. (jun. de 2018). «Materials for lithium-ion battery safety». Em: *Science Advances* 4, eaas9820. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9820>.
- Martins, J. e F. Brito (2011). *Carros Elétricos*. Publindústria, Edições Técnicas, Lda., Guimarães. isbn: 978-989-723-000-4.
- Panasonic Corporation (s.d.). *Specifications for NCR18650GA Lithium-ion Battery*. Technical Specification 4J14Z5UTAS. Panasonic Corporation.
- Panchal, S. et al. (2016). «Thermal modeling and validation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at different discharge rates and varying boundary conditions». Em: *Applied Thermal Engineering* 96, pp. 190–199. issn: 1359-4311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.019>.
- Pandian, Meiyappan et al. (out. de 2010). «Efficiency and Economics Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell». Em: *2010 Conference Proceedings IPEC*.
- Pistoia, Gianfranco (2009). *Battery Operated Devices and Systems*. Elsevier. isbn: 978-0-444-53214-5. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53214-5.X0001-5>.
- Qi, Jian e Dylan Dah-Chuan Lu (2014). «Review of battery cell balancing techniques». Em: *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1–6. doi: <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966514>.
- Reddy, Vennapusa Jagadeeswara et al. (2024). «Sustainable Vehicles for Decarbonizing the Transport Sector: A Comparison of Biofuel, Electric, Fuel Cell and Solar-Powered Vehicles». Em: *World Electric Vehicle Journal* 15.3. doi: <https://doi.org/10.3390/wevj15030093>.
- Sadeq, Abdellatif (abr. de 2024). *Hybrid and Electric Vehicles - A Comprehensive Guide*. isbn: 979-8-9907836-8-3. doi: <https://doi.org/10.13980/RG.2.2.33942.85975>.

- Sanguesa, Julio A et al. (2021). «A review on electric vehicles: Technologies and challenges». Em: *Smart Cities* 4.1, pp. 372–404. doi: <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>.
- SANYO Electric Co.,Ltd (jan. de 2015). *LITHIUM ION SPECIFICATION - NCR18650*. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079931>.
- Sethia, Gautam et al. (jan. de 2021). «Strict Lyapunov super twisting observer design for state of charge prediction of lithium-ion batteries». Em: *IET Renewable Power Generation* 15. doi: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12039>.
- Sidhu, Amardeep, Afshin Izadian e Sohel Anwar (fev. de 2015). «Adaptive Nonlinear Model-Based Fault Diagnosis of Li-Ion Batteries». Em: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62, pp. 1002–1011. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2336599>.
- SkyRC Technology Co., Ltd. (out. de 2022). *eFUEL 1200W, 50A AC/DC Switching Power Supply V2: Instruction Manual*. Versão V2.0. Shenzhen, China. url: https://www.skyrc.com/psu_50a.
- Sohu Auto (mai. de 2025). *HC85120GC1-20: First 20 Ah Semi-Solid Battery Cell Production and Review*. Acedido a 16 de agosto de 2025. url: https://www.sohu.com/a/894222344_121898509.
- Sun, Weihao, Bihan Wang e Ziyi Wang (ago. de 2024). «Thermal Runaway and Thermal Management of Lithium-Ion Power Batteries in New Energy Vehicles». Em: *Highlights in Science, Engineering and Technology* 112, pp. 152–159. doi: <https://doi.org/10.54097/et63r740>.
- Szramowiat, M et al. (2018). «Comparison of fuel consumption between a vehicle with standard and hybrid drive system». Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 421. 4. IOP Publishing, pp. 042–068. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/421/4/0420>.
- Tesla, Inc. (dez. de 2024). *Tesla Model 3 - Manual de Proprietário*. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14581996>.
- Thangavel, Saravanakumar et al. (2023). «A Comprehensive Review on Electric Vehicle: Battery Management System, Charging Station, Traction Motors». Em: *IEEE Access* 11, pp. 20994–21019. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3250221>.
- Tycorun Energy (jul. de 2023). *Charging and Discharging of Lithium-Ion Battery*. Acedido a 15 de junho de 2025. url: <https://batteryswapstation.com/charging-and-discharging-of-lithium-ion-battery/>.
- U.S. Consumer Product Safety Commission (2006). *Sony Recalls Notebook Computer Batteries Due to Previous Fires*. Acedido a 8 de abril de 2025. url: <https://www.cpsc.gov/Recalls/2006/sony-recalls-notebook-computer-batteries-due-to-previous-fires>.
- UNECE (jan. de 2017). *Regulation No 138 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility [2017/71]*.
- Valorcar - Sociedade de Gestão de Veículos em Fim de Vida, Lda. (2019). *GUIA DE GESTÃO DE RESÍDUOS DE BATERIAS E ACUMULADORES - 2019*. url: <https://www.valorcar.pt/pt/biblioteca#documentos>.
- Van Sterkenburg, S. et al. (2011). «Analysis of regenerative braking efficiency — A case study of two electric vehicles operating in the Rotterdam area». Em: *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1–6. doi: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043109>.
- Vengatesan, S, Arunkumar Jayakumar e Kishor Kumar Sadasivuni (2024). «FCEV vs. BEV — A short overview on identifying the key contributors to affordable & clean energy

- (SDG-7)». Em: *Energy Strategy Reviews* 53, p. 101380. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101380>.
- Vidyanandan, K.V. (mar. de 2018). «Overview of Electric and Hybrid Vehicles». Em: *Energy Scan (A House e-Journal of Corporate Planning, NTPC Ltd., India)* III, pp. 7–14.
- (jun. de 2019). «Batteries for Electric Vehicles». Em: *Energy Scan (A House e-Journal of Corporate Planning, NTPC Ltd., India)* I.38.
- Warner, J.T. (2015). *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology*. Elsevier. isbn: 9780128014561. doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-23144-5>.
- WELION Energy (2025). SHP320-35. Acedido a 16 de agosto de 2025. url: <https://welion-energy.com/SHP320-35/30000108>.
- Wulandari, Triana et al. (2023). «Lithium-based batteries, history, current status, challenges, and future perspectives». Em: *Battery Energy* 2.6, pp. 01–53. doi: <https://doi.org/10.1002/bte2.20230030>.
- Xiao, Jie et al. (ago. de 2020). «Understanding and applying coulombic efficiency in lithium metal batteries». Em: *Nature Energy* 5.8, pp. 561–568. doi: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0648-z>.
- Yu, Quan-Qing et al. (2018). «A comparative study on open circuit voltage models for lithium-ion batteries». Em: *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 31.1, pp. 1–8. doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0268-8>.
- Yüksek, Gökhan e Alkan Alkaya (2023). «Effect of the Depth of Discharge and C-Rate on Battery Degradation and Cycle Life». Em: *2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, pp. 1–5. doi: <https://doi.org/10.1109/ELECO60389.2023.10415967>.
- Zhang, Xinghui et al. (2022). «A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles». Em: *Energy* 238, p. 121652. issn: 0360-5442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121652>.
- Zhao, Rui et al. (2015). «A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system». Em: *Journal of Power Sources* 299, pp. 557–577. issn: 0378-7753. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.001>.

Apêndice A

Capacidade das Baterias de Diferentes Veículos Elétricos

Tabela A.1: Capacidade das baterias de diferentes veículos elétricos.
Adaptado de: Sanguesa et al. 2021

Ano	Veículo	Capacidade (kWh)
1983	Audi duo	8
1985	Volkswagen Jetta citySTROMer	17.3
1987	Volkswagen Golf	8
1988	Skoda Favorit	10
1990	Fiat Panda Elettra	9
1996	General Motors EV1	16.5
1997	Audi duo	10
1999	General Motors EV1	18.7
2000	General Motors EV1	26.4
2006	Tesla Roadster	53
2007	Smart ed	13.2
	Tesla Roadster	53
2009	BYD e6	72
	Mitsubishi i-MiEV	16
	Nissan Leaf	24
	Smart ed	16.5
	Tesla Roadster	53
2010	BYD e6	48
	Mercedes-Benz SLS AMG E-Drive	60
	Tata Indica Vista EV	26.5
	Tesla Roadster	53
	Volvo C30 EV	24
	Volvo V70 PHEV	11.3
2011	BMW ActiveE	32
	BMW i3	16
	BYD e6	60
	Ford Focus Electric	23
	Mia electric	8, 12
	Mitsubishi i-MiEV	10.5
	Renault Fluence Z.E	22
2012	Chevrolet Spark EV	21.3

Continuação da Tabela A.1		
Ano	Veículo	Capacidade (kWh)
	Ford Focus Electric	23
	Renault Zoe	22
	Tesla Model S	40, 60, 85
2013	BMW i3	22
	BYD e6	64
	Smart ed	17.6
	Volkswagen e-Golf	26.5
2014	Renault Fluence Z.E	22
	Tesla Roadster	80
2015	Chevrolet Spark EV	19
	Mercedes-Benz Classe B E-Drive	28
	Tesla Model S	70, 90
2016	BYD e6	82
	Chevrolet Volt	18.4
	Kia Soul EV	27
	Nissan Leaf	30
	Renault Zoe	41
	Tesla Model 3	50, 75
	Tesla Model X	90, 100
2017	BMW i3	33
	Ford Focus Electric	33.5
	Honda Clarity EV	25.5
	Jaguar I-Pace	90
	Nissan Leaf	40
	Tesla Model S	75, 100
	Volkswagen e-Golf	35.8
2018	Audi e-tron	95
	Kia Soul EV	30
	Nissan Leaf	60
	Renault ZOE 2	60
	Renault ZOE 2 rs	100
	Tesla Model 3	70, 90
2019	Mercedes-Benz EQ	70
	Nissan Leaf	60
	Volvo 40 series	100
2020	Audi e-tron	95
	BMW i3	42
	Hyundai Kauai e	64
	Mercedes-Benz EQC	93
	Mini Cooper SE	32.6
	Peugeot e-208	50
2021	Volkswagen ID.3	77
	Ford Mustang Mach-E	99
2022	Tesla Roadster	200

Apêndice B

Teste de SoC à bateria de chumbo-ácido

O estado de carga (SoC) de uma bateria de chumbo-ácido pode ser estimado através da medição da **tensão de repouso em circuito aberto, após um período mínimo de repouso de duas horas**, sem aplicação de carga ou descarga. Esta abordagem, apresentada por Kitaronka 2022, oferece uma estimativa simples e eficaz do nível de carga da bateria, dispensando a utilização de sistemas de gestão mais complexos.

A Tabela B.1 apresenta a relação entre a tensão de leitura e o SoC correspondente, com base em valores típicos para baterias de chumbo-ácido líquido, à temperatura ambiente de 25 °C.

Tabela B.1: Teste de SoC à bateria de chumbo-ácido, com valores típicos de tensão.

Adaptado de: Kitaronka 2022

Estado de Carga (SoC)	Tensão (V)	Comportamento Esperado
100%	12.70	Manter a bateria nesta zona garante uma expectativa de vida razoável
95%	12.60	
90%	12.50	
80%	12.42	
70%	12.32	
60%	12.20	
50%	12.06	
40%	11.90	Eventualmente atingir esta zona é aceitável, mas não recomendado. Descargas repetidas reduzem a vida útil da bateria.
30%	11.75	
20%	11.58	
10%	11.31	Ocorrerá dano permanente
Abaixo de 10% (MORTA)	≤ 10.50	

Observações:

- Operar regularmente entre 80 % e 50 % de SoC promove uma maior durabilidade da bateria, evitando ciclos de descarga profunda que aceleram a degradação química;
- Tensões inferiores a 11.90 V indicam que a bateria se encontra num estado de carga baixo, podendo, se recorrente, provocar efeitos irreversíveis como a sulfatização das placas internas;
- A tensão em circuito aberto é influenciada pela temperatura: em ambientes frios, os valores podem ser ligeiramente inferiores, sendo necessário ajustar a interpretação consoante o contexto;
- As baterias recém-carregadas apresentarão uma tensão superficial mais elevada, que diminui naturalmente ao fim de pelo menos 2 horas.

Apêndice C

Curvas Típicas de Tensão vs. SoC das Tecnologias de Bateria Ensaçadas

As curvas apresentadas neste apêndice mostram a relação típica entre a tensão e o estado de carga (SoC) para diferentes tecnologias de baterias. Na maioria dos casos, os valores correspondem à tensão em circuito aberto (OCV), medida após um período de repouso que garante a estabilização eletroquímica.

Em funcionamento real, a tensão nos terminais difere da OCV devido à resistência interna, que provoca quedas (em descarga) ou elevações (em carga) proporcionais à corrente aplicada (Denton 2020). Assim, as curvas OCV–SoC são úteis como referência para estimativa de SoC e caracterização teórica, mas em operação prática a tensão em circuito fechado será sempre influenciada pela corrente, temperatura e estado de saúde (SoH) da bateria.

Na Figura C.1 estão representadas graficamente as curvas características de descarga da célula Sanyo NCR18650GA, retiradas diretamente do seu *datasheet*.

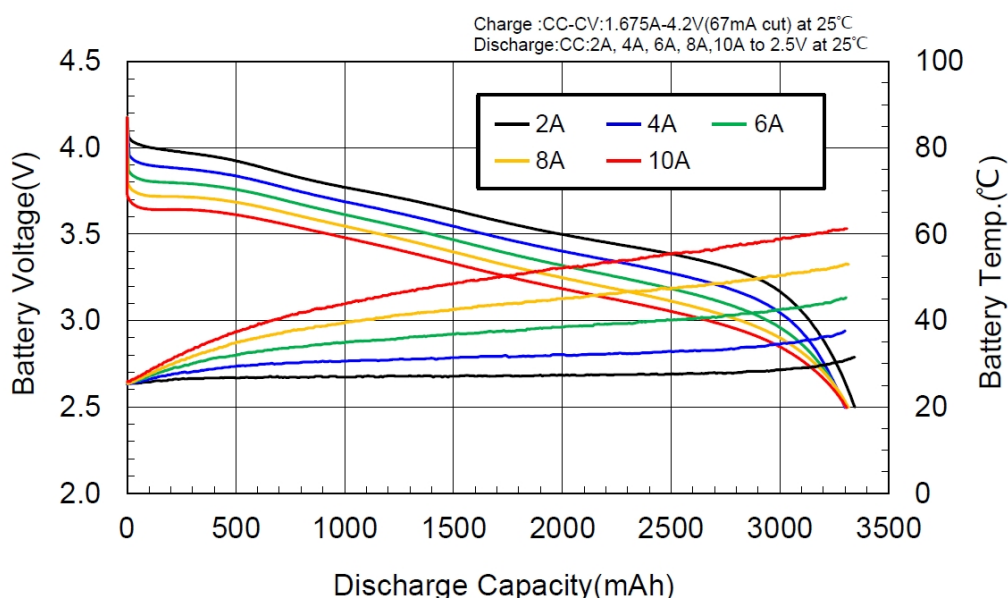


Figura C.1: Curvas de Descarga da célula NCR18650GA (NCA).
Retirado de: Panasonic Corporation s.d.

Contrariamente ao *datasheet* da Bateria 1, nas fichas técnicas das restantes baterias não estão presentes curvas de carga ou descarga nem nenhuma outra informação que tronasse possível associar determinada tensão a um nível de estado de carga. Por este mesmo motivo, a tensão nos pontos de SoC de interesse foi estimada com base no valores típicos representados abaixo nas curvas das Figuras C.2, C.3 e C.4 e na Tabela C.1.

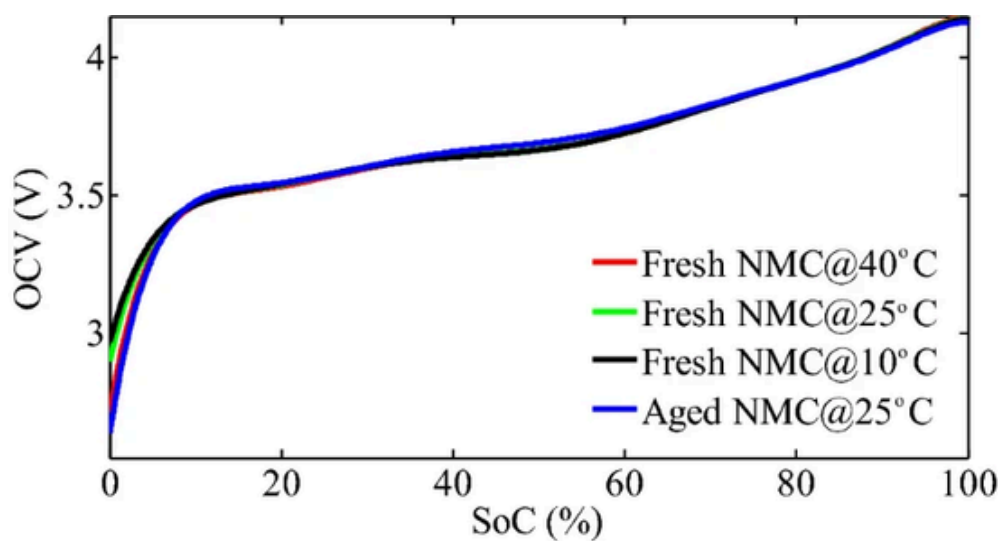


Figura C.2: Curvas de Carga Típica de uma Bateria NCM.
Retirado de: Yu et al. 2018.

Tabela C.1: Tensão Típica em função do SoC em Baterias AGM 12V.
Adaptado de: Battery Equivalents 2024.

SoC	Tensão
100 %	12.80 V
75 %	12.60 V
50 %	12.30 V
25 %	12.00 V
0 %	11.80 V

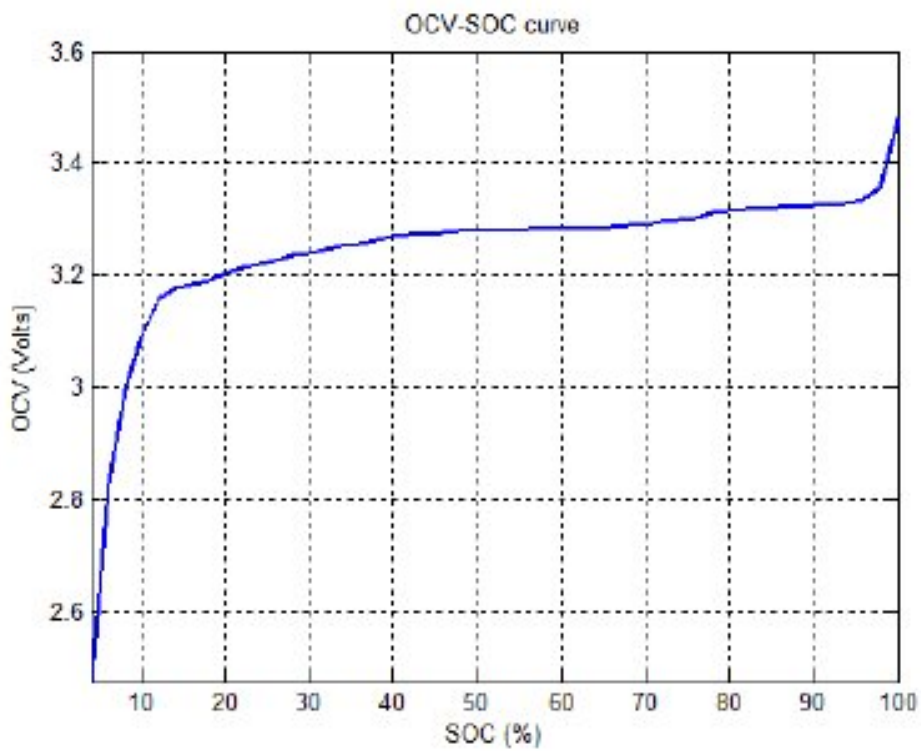


Figura C.3: Curva de Carga Experimental de uma Bateria *LFP*.
Retirado de: Sidhu, Izadian e Anwar 2015.

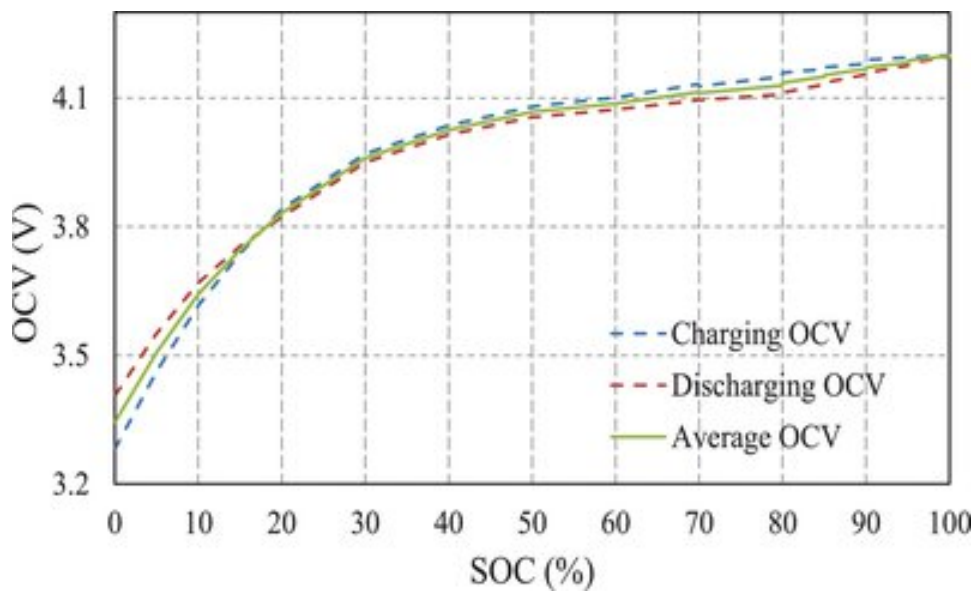


Figura C.4: Curva de Carga Típica de uma Bateria *Li - Po*.
Retirado de: Sethia et al. 2021.

Apêndice D

Ensaios Realizados - Bateria 1

Este apêndice apresenta os registos gráficos dos ensaios realizados com a Bateria 1 - Sanyo NCR18650GA. Cada gráfico corresponde a uma carga ou descarga, obtido com os equipamentos e métodos descritos no Capítulo 5. Os ensaios foram realizados em regime CC-CV, no caso das cargas, e em regime CP-CV no caso das descargas, com diferentes valores de C-rate. A tensão, a corrente e a capacidade acumulada foram continuamente monitorizadas ao longo do tempo.

Os gráficos encontram-se organizados com a imagem do ensaio à esquerda e um comentário técnico à direita, que inclui:

- U [V]: intervalo de tensão (tensão mínima e máxima registada);
- Cap [mAh]: capacidade medida (em valor absoluto);
- ΔT [°C]: variação de temperatura;
- I_{\max} [A]: corrente máxima aplicada (em valor absoluto);
- t [hh:mm:ss]: duração do ensaio.

Cada gráfico está identificado, seguindo a seguinte nomenclatura:

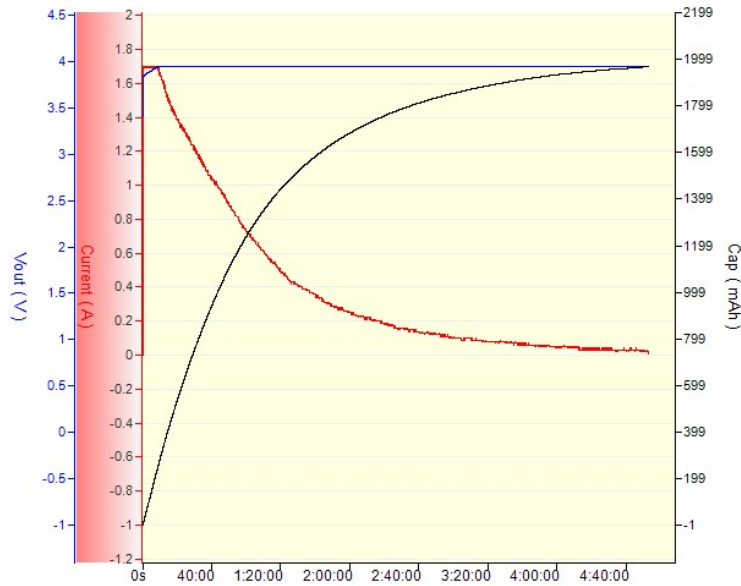
BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3

onde:

- BAT1 é o identificador da Bateria 1;
- #1 indica o âmbito do caso de estudo realizado (se Caso de Estudo #1 ou #2);
- 20-80 refere-se à faixa de SoC do ciclo realizado, se parcial (20-80) ou se completo (0-100);
- DISCHARGE indica um ensaio de descarga, CHARGE se carga;
- 1.0C identifica o C-rate utilizado no ensaio;
- 3 refere-se ao número do ensaio (1, 2 ou 3 dado que foram realizados 3 ensaios para cada situação).

Este conjunto de dados complementa os resultados apresentados no Capítulo 6, permitindo uma análise visual da resposta desta bateria sob as diferentes condições testadas.

D.1 20–80 % SoC



U [V]: 3.408–3.954 V

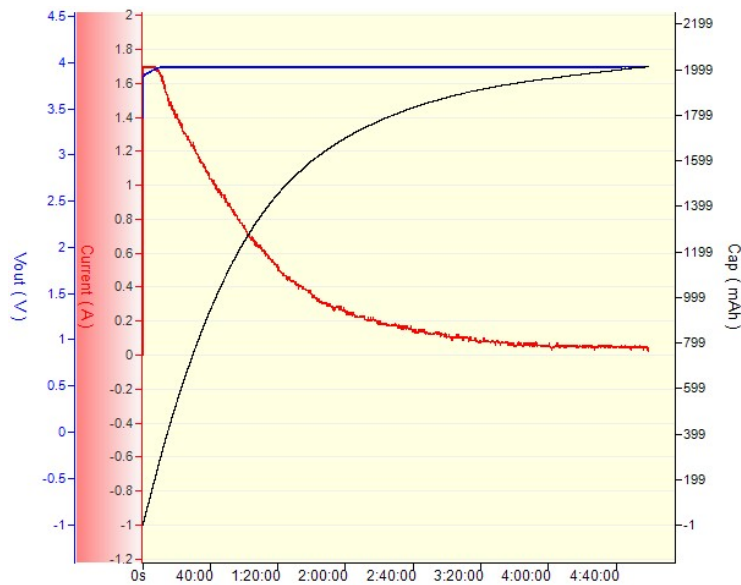
Cap [mAh]: 1967 mAh

ΔT [°C]: Não Registada

I_{\max} [A]: 1.7 A

t [hh:mm:ss]: 04:53:09

Figura D.1: BAT1_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1



U [V]: 3.404–3.963 V

Cap [mAh]: 2012 mAh

ΔT [°C]: Não Registada

I_{\max} [A]: 1.7 A

t [hh:mm:ss]: 4:59:02

Figura D.2: BAT1_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2

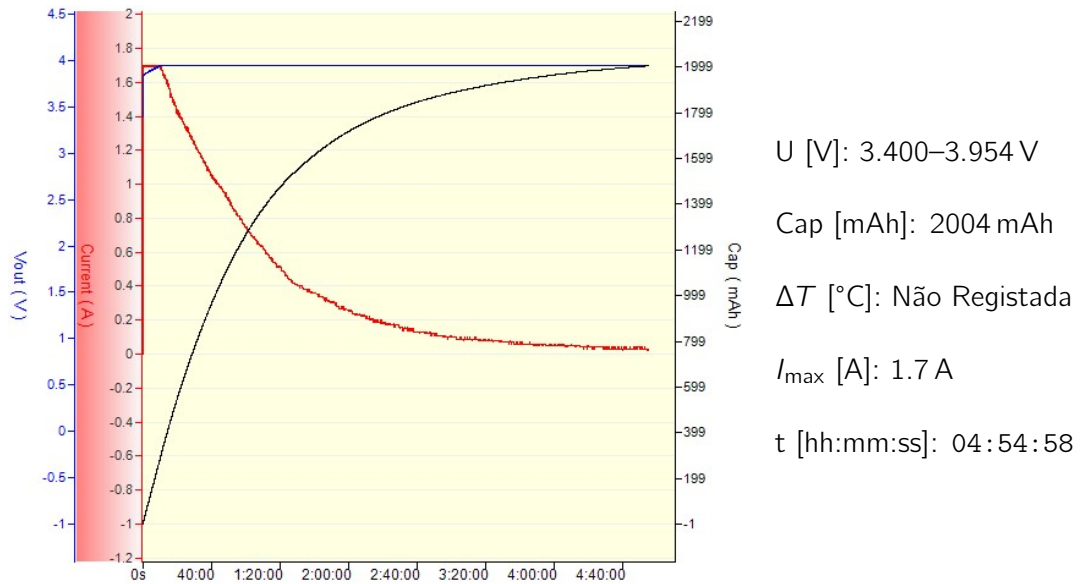


Figura D.3: BAT1_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3

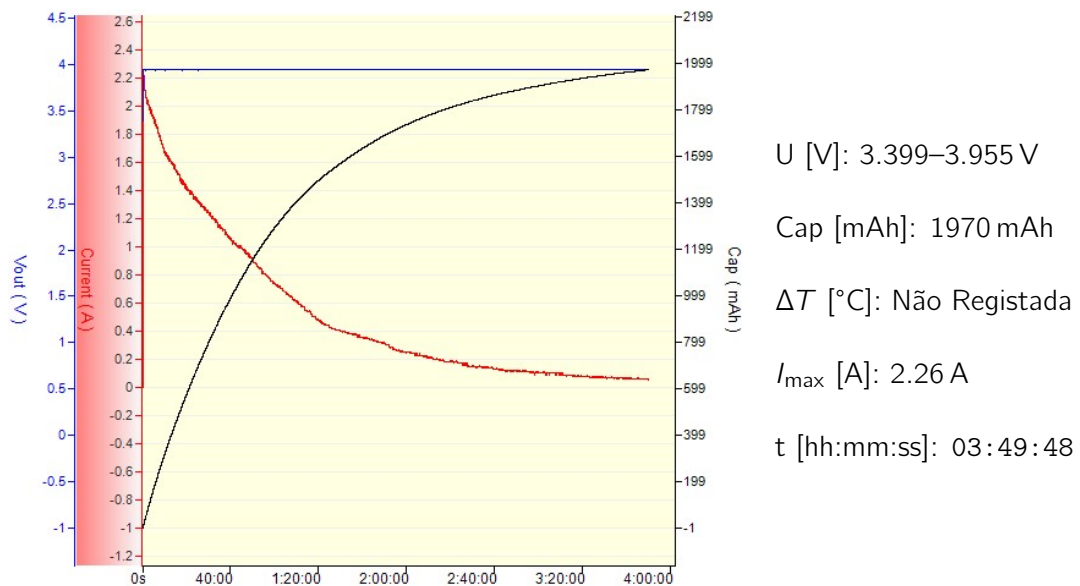
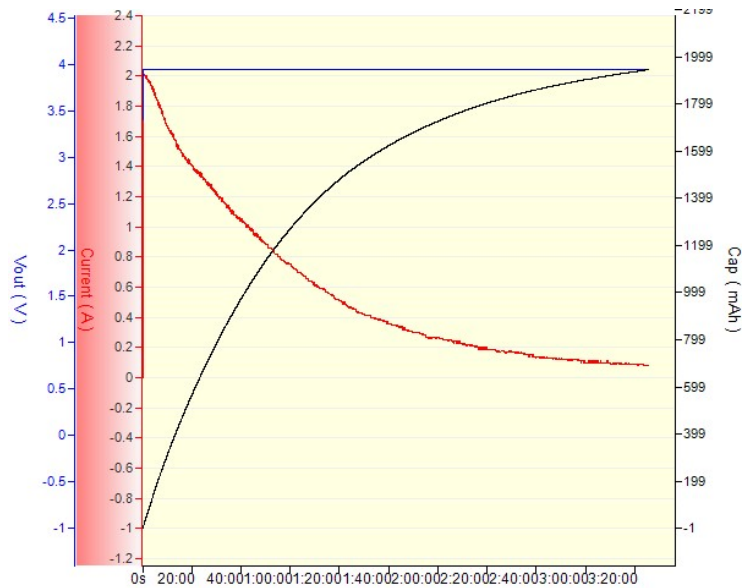


Figura D.4: BAT1_#1_20-80_CHARGE_1.0C_1



U [V]: 3.408–3.954 V

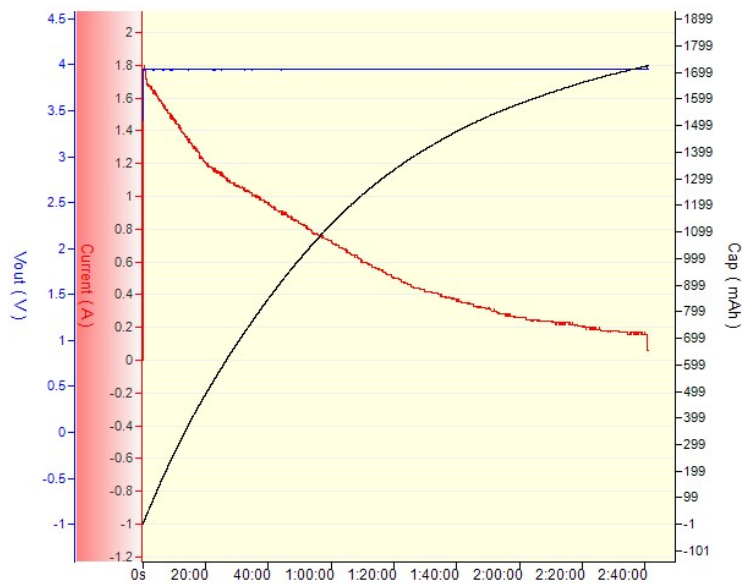
Cap [mAh]: 1944 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{\max} [A]: 2.04 A

t [hh:mm:ss]: 03:25:28

Figura D.5: BAT1_#1_20-80_CHARGE_1.0C_2



U [V]: 3.397–3.991 V

Cap [mAh]: 1724 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{\max} [A]: 2.04 A

t [hh:mm:ss]: 02:40:49

Figura D.6: BAT1_#1_20-80_CHARGE_1.0C_3

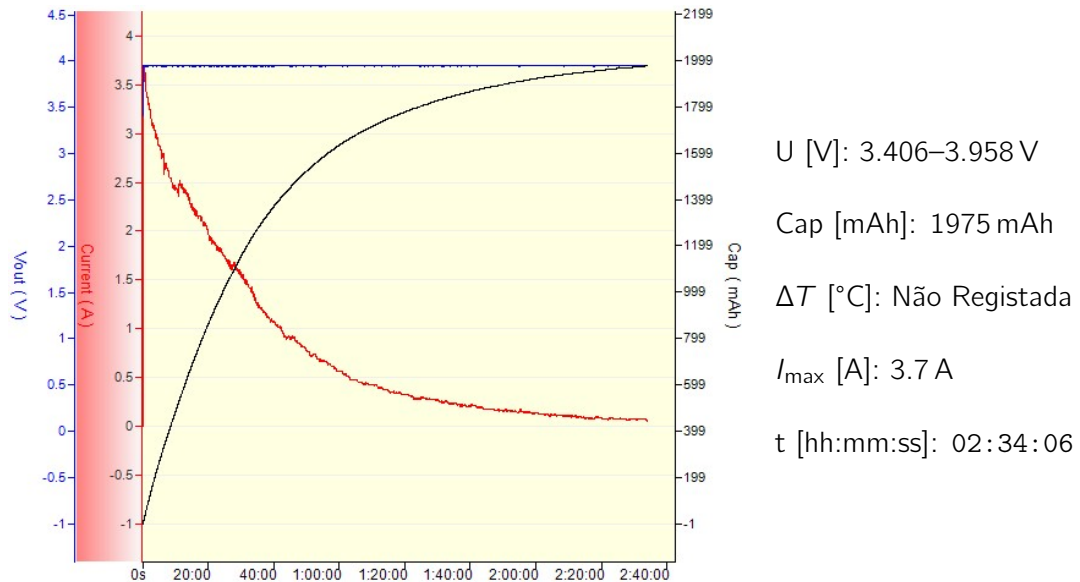


Figura D.7: BAT1_#1_20-80_CHARGE_2.0C_1

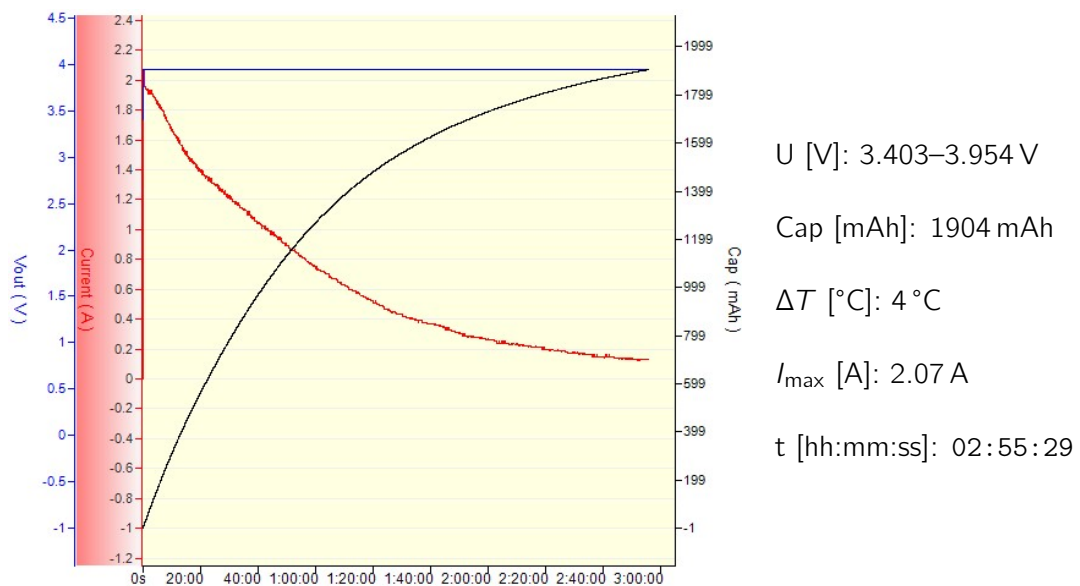
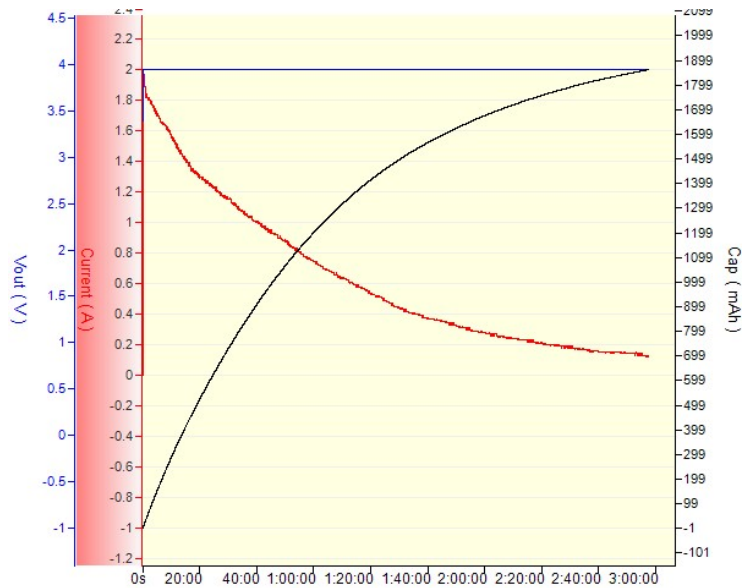


Figura D.8: BAT1_#1_20-80_CHARGE_2.0C_2



U [V]: 3.391–3.955 V

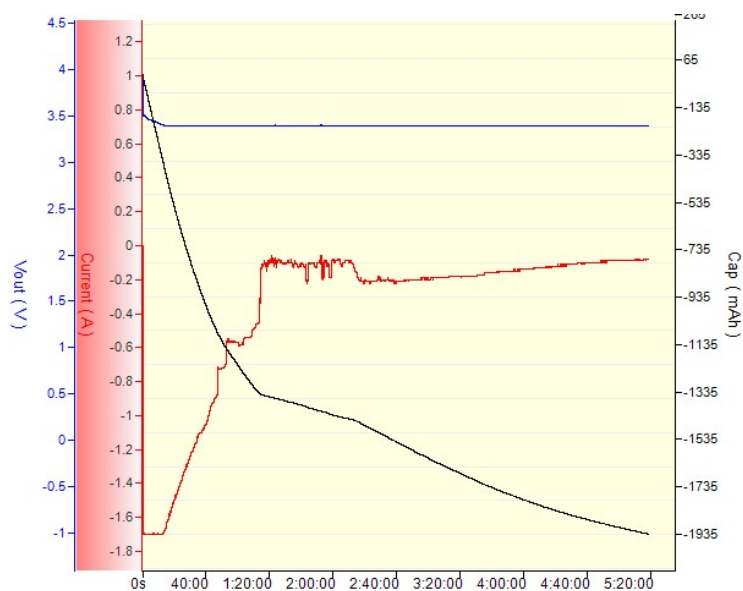
Cap [mAh]: 1861 mAh

ΔT [°C]: 4 °C

I_{\max} [A]: 2.07 A

t [hh:mm:ss]: 02:57:16

Figura D.9: BAT1_#1_20-80_CHARGE_2.0C_3



U [V]: 3.394–3.954 V

Cap [mAh]: 1935 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 1.7 A

t [hh:mm:ss]: 05:18:27

Figura D.10: BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1

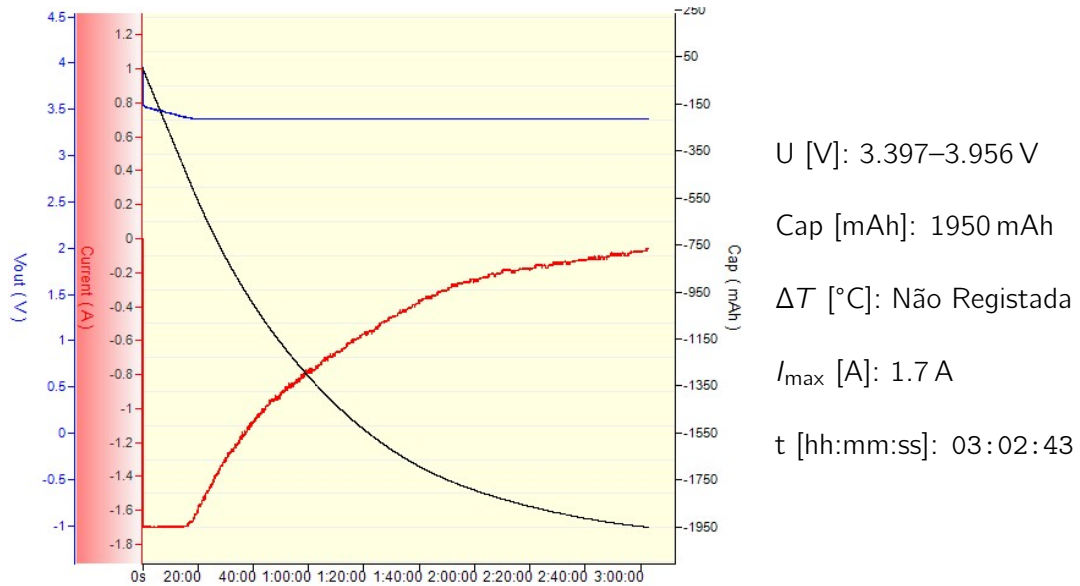


Figura D.11: BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2

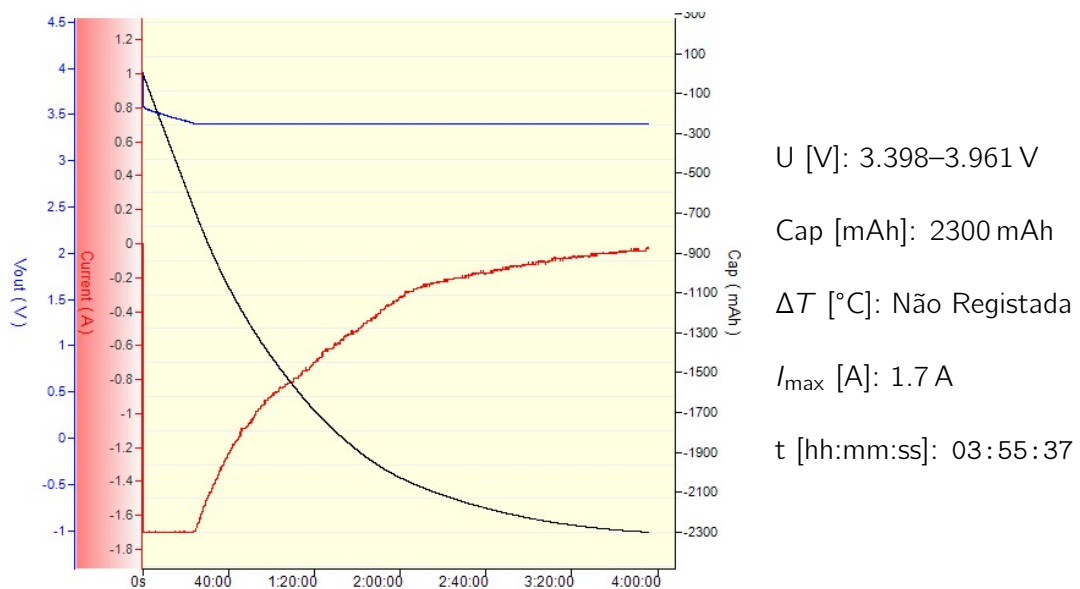
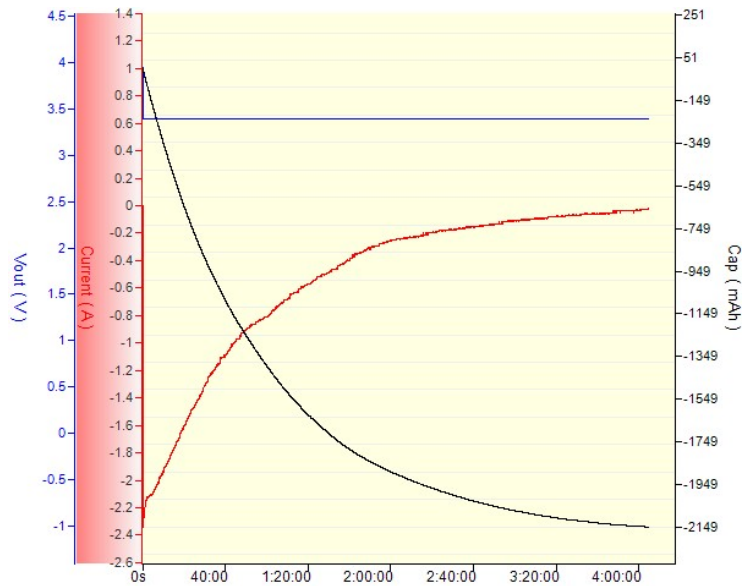


Figura D.12: BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3



U [V]: 3.398–3.955 V

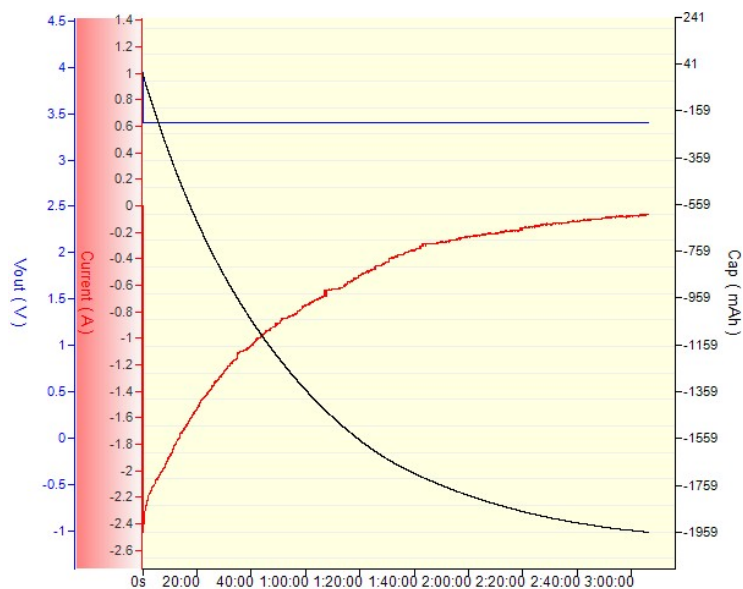
Cap [mAh]: 2149 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 2.34 A

t [hh:mm:ss]: 04:04:29

Figura D.13: BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_1



U [V]: 3.398–3.947 V

Cap [mAh]: 1959 mAh

ΔT [°C]: 4 °C

I_{\max} [A]: 2.46 A

t [hh:mm:ss]: 03:06:00

Figura D.14: BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_2

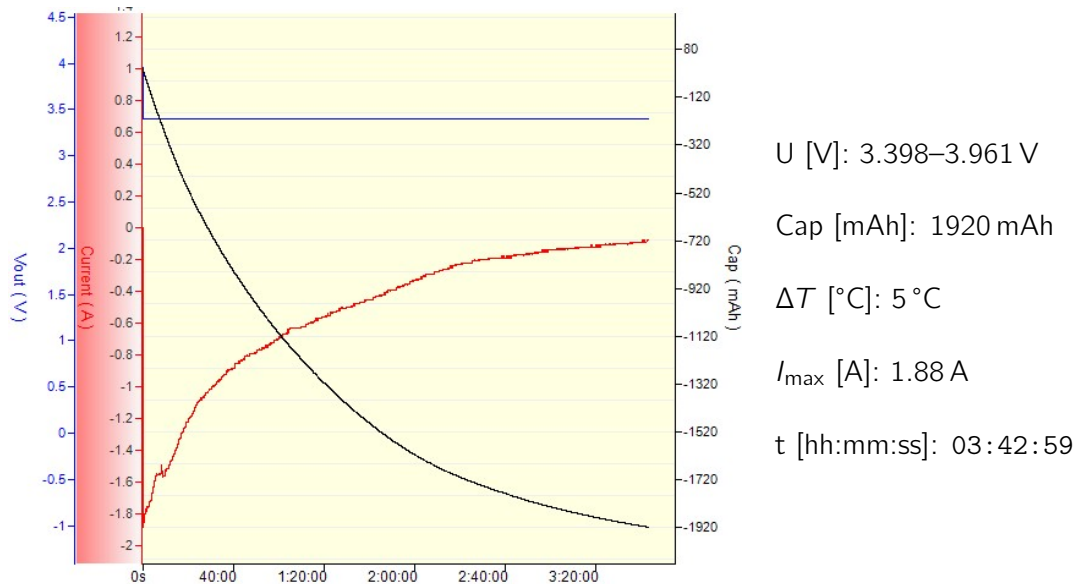


Figura D.15: BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3

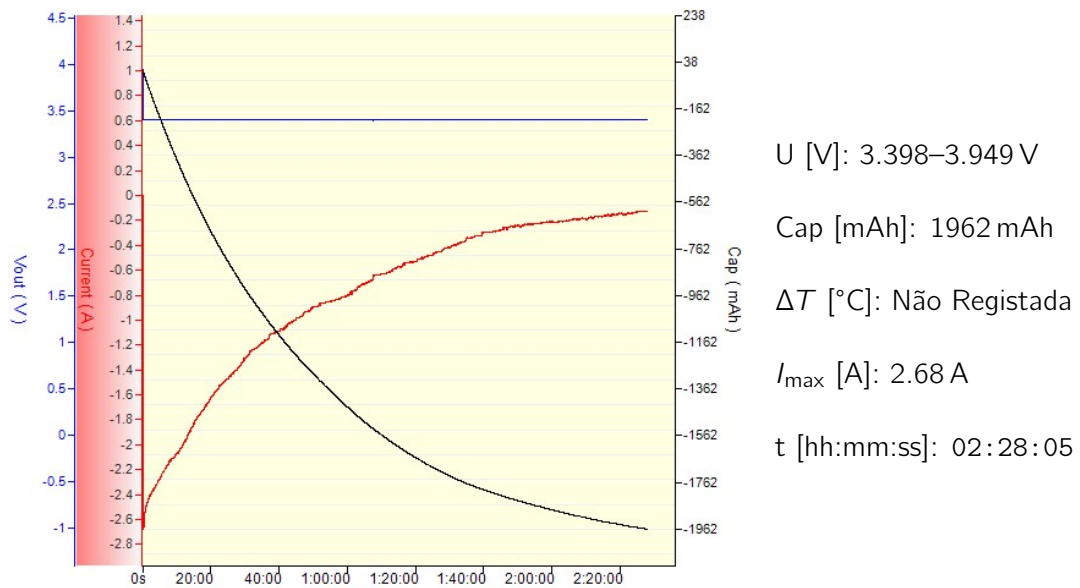
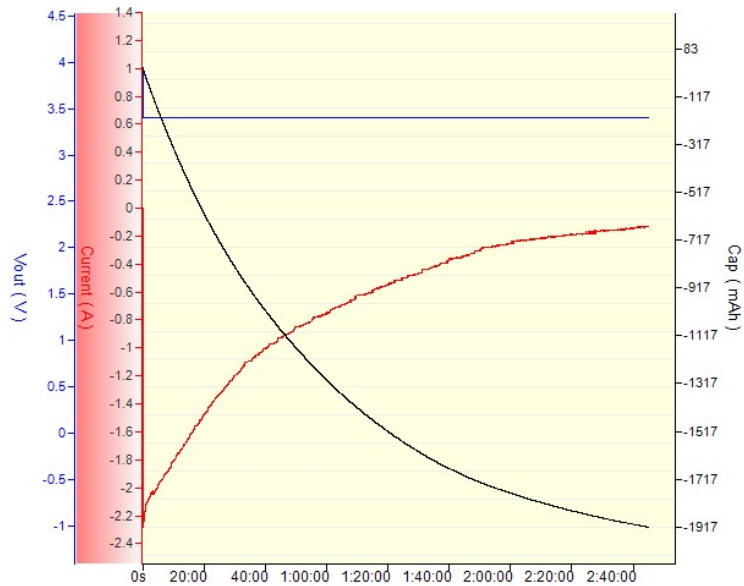


Figura D.16: BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_1



U [V]: 3.398–3.947 V

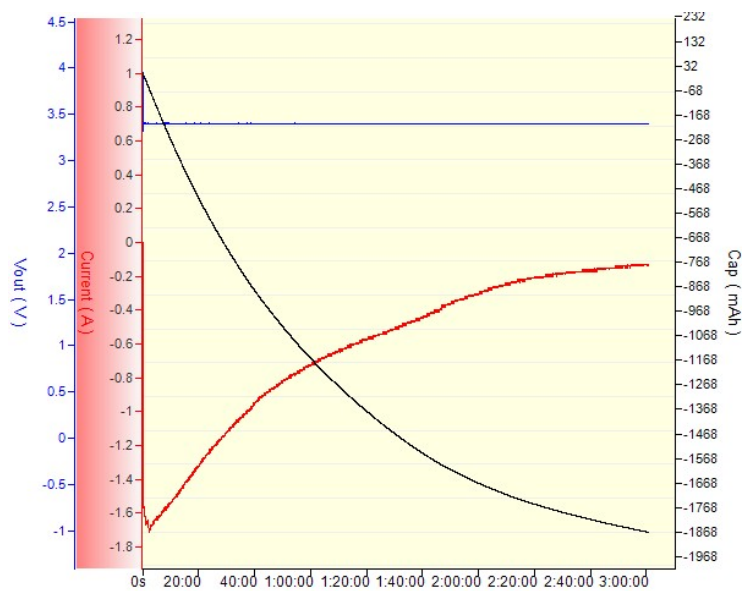
Cap [mAh]: 1917 mAh

ΔT [°C]: 4 °C

I_{\max} [A]: 2.28 A

t [hh:mm:ss]: 02:44:48

Figura D.17: BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_2



U [V]: 3.316–3.958 V

Cap [mAh]: 1868 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{\max} [A]: 1.71 A

t [hh:mm:ss]: 03:00:30

Figura D.18: BAT1_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_3

D.2 0–100 % SoC

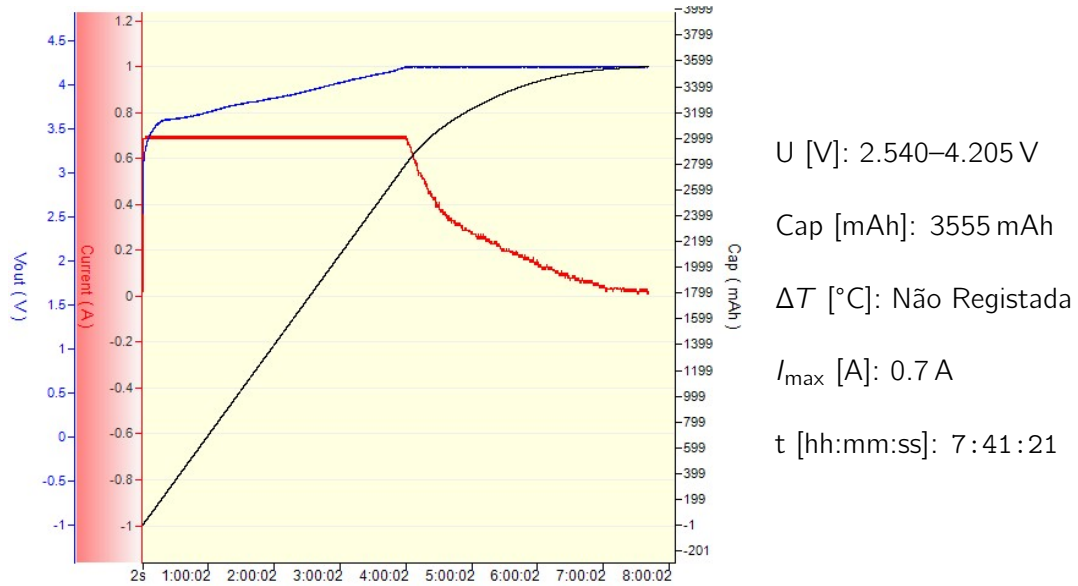


Figura D.19: BAT1_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1

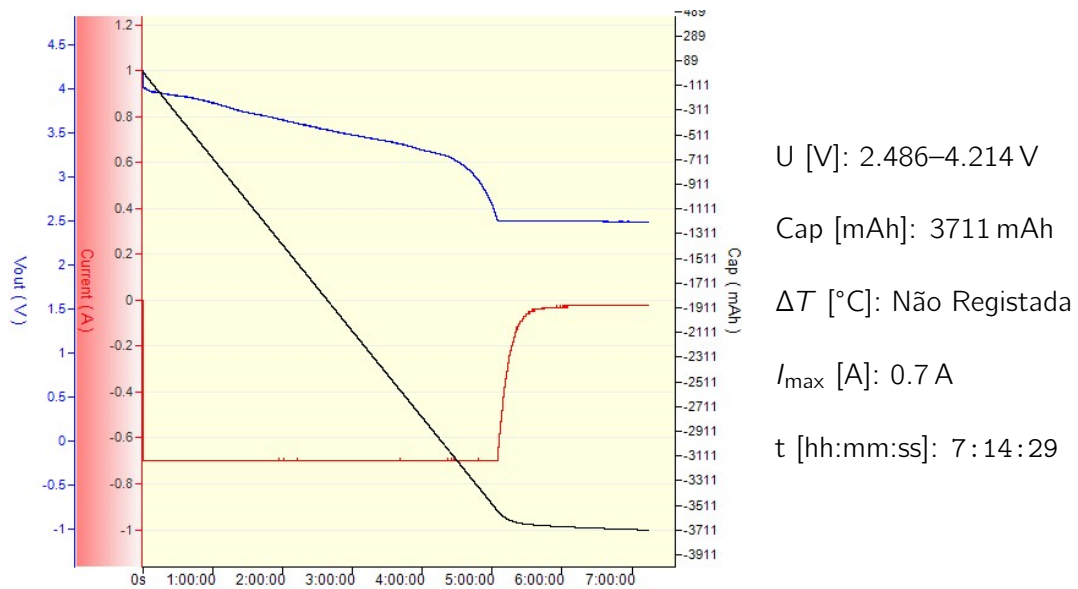


Figura D.20: BAT1_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1

Apêndice E

Ensaios Realizados - Bateria 2

Este apêndice apresenta os registos gráficos dos ensaios realizados com a Bateria 2 - SHP320-35. Cada gráfico corresponde a uma carga ou descarga, obtido com os equipamentos e métodos descritos no Capítulo 5. Os ensaios foram realizados em regime CC-CV, no caso das cargas, e em regime CP-CV no caso das descargas, com diferentes valores de C-rate. A tensão, a corrente e a capacidade acumulada foram continuamente monitorizadas ao longo do tempo.

Os gráficos encontram-se organizados com a imagem do ensaio à esquerda e um comentário técnico à direita, que inclui:

- U [V]: intervalo de tensão (tensão mínima e máxima registada);
- Cap [mAh]: capacidade medida (em valor absoluto);
- ΔT [°C]: variação de temperatura;
- I_{max} [A]: corrente máxima aplicada (em valor absoluto);
- t [hh:mm:ss]: duração do ensaio.

Cada gráfico está identificado, seguindo a seguinte nomenclatura:

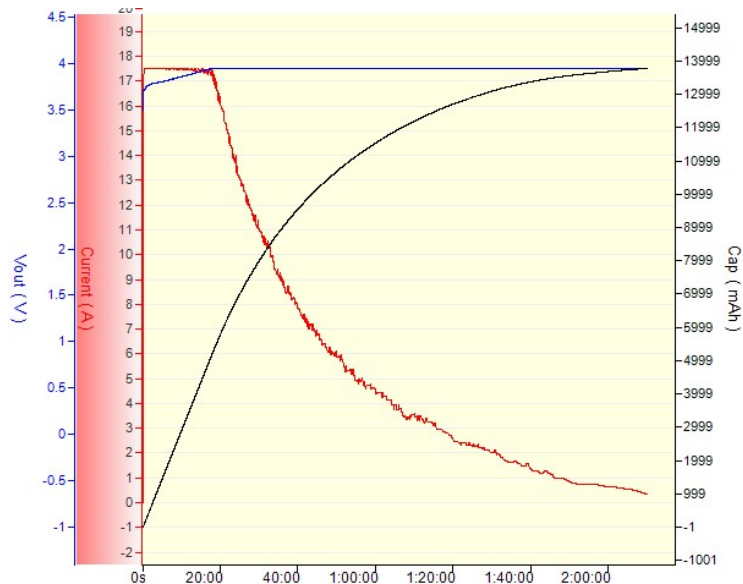
BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3

onde:

- BAT2 é o identificador da Bateria 2;
- #1 indica o âmbito do caso de estudo realizado (se Caso de Estudo #1 ou #2);
- 20-80 refere-se à faixa de SoC do ciclo realizado, se parcial (20-80) ou se completo (0-100);
- DISCHARGE indica um ensaio de descarga, CHARGE se carga;
- 0.5C identifica o C-rate utilizado no ensaio;
- 3 refere-se ao número do ensaio (1, 2 ou 3 dado que foram realizados 3 ensaios para cada situação).

Este conjunto de dados complementa os resultados apresentados no Capítulo 6, permitindo uma análise visual da resposta desta bateria sob as diferentes condições testadas.

E.1 20–80 % SoC



U [V]: 3.501–3.954 V

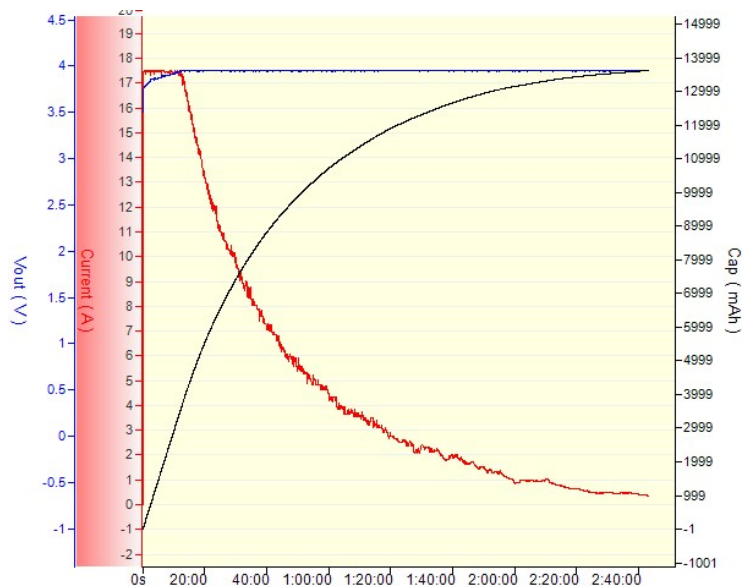
Cap [mAh]: 13 772 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 17.5 A

t [hh:mm:ss]: 02:10:11

Figura E.1: BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1



U [V]: 3.501–3.957 V

Cap [mAh]: 13 625 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{\max} [A]: 17.5 A

t [hh:mm:ss]: 02:42:57

Figura E.2: BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2

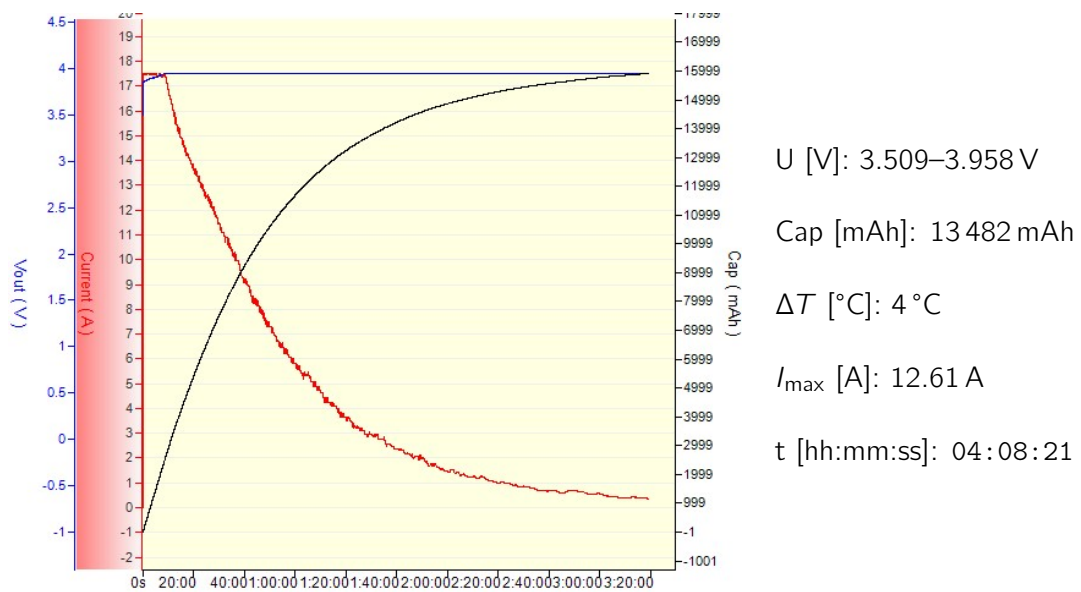


Figura E.3: BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3

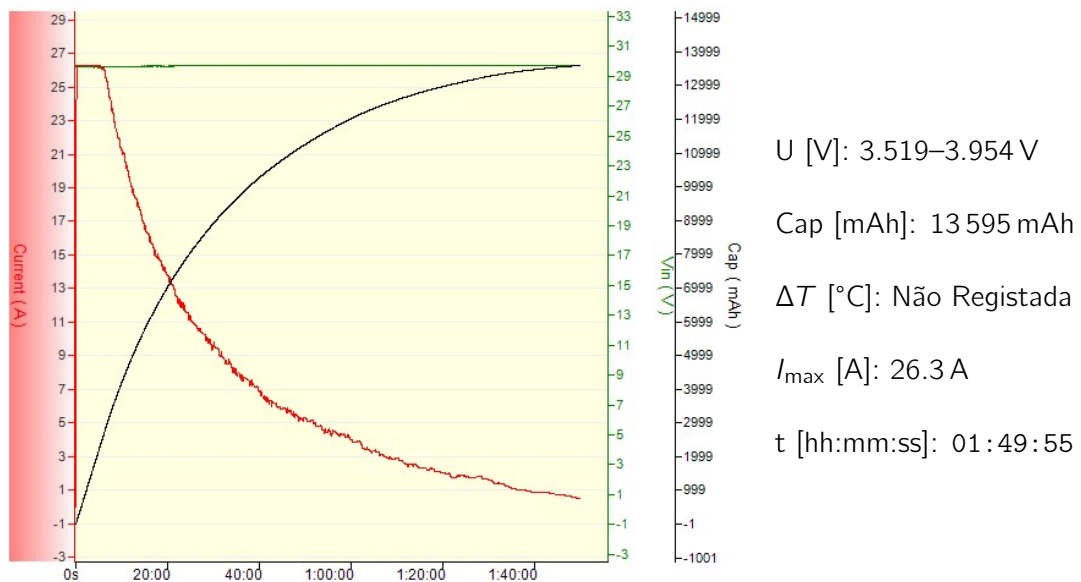
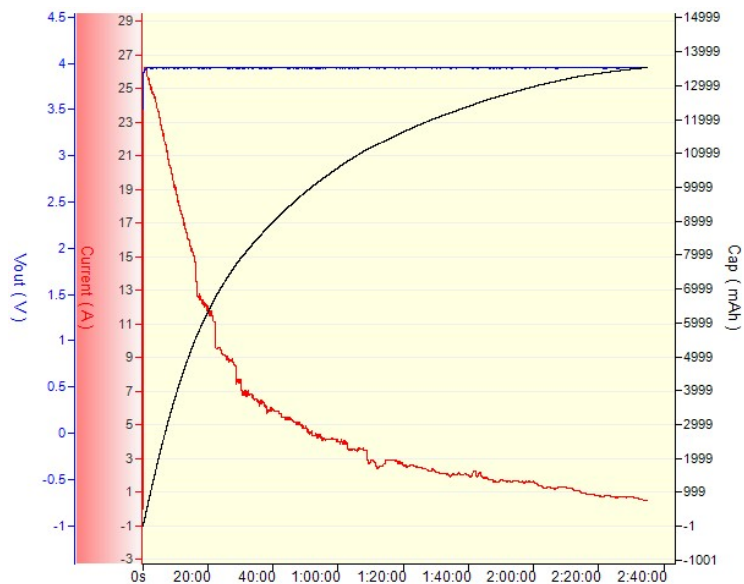


Figura E.4: BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.75C_1



U [V]: 3.499–3.960 V

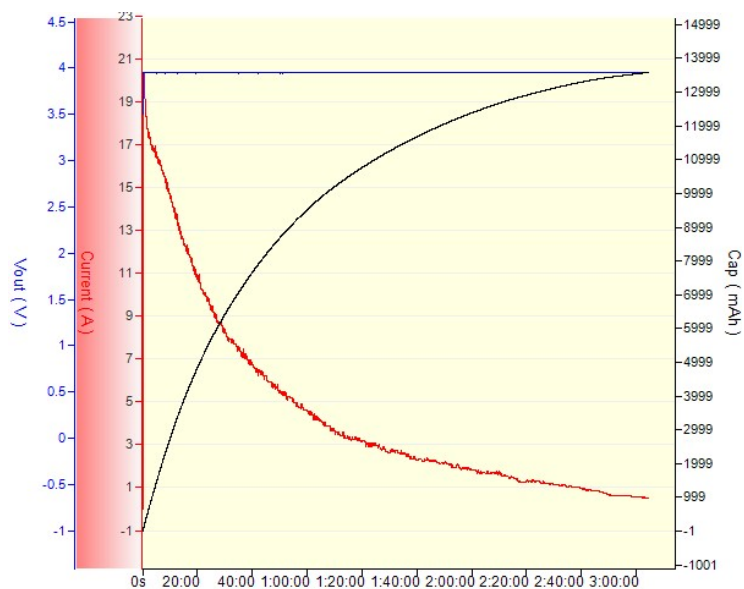
Cap [mAh]: 13 536 mAh

ΔT [°C]: 5 °C

I_{\max} [A]: 26.27 A

t [hh:mm:ss]: 02:35:03

Figura E.5: BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.75C_2



U [V]: 3.497–3.956 V

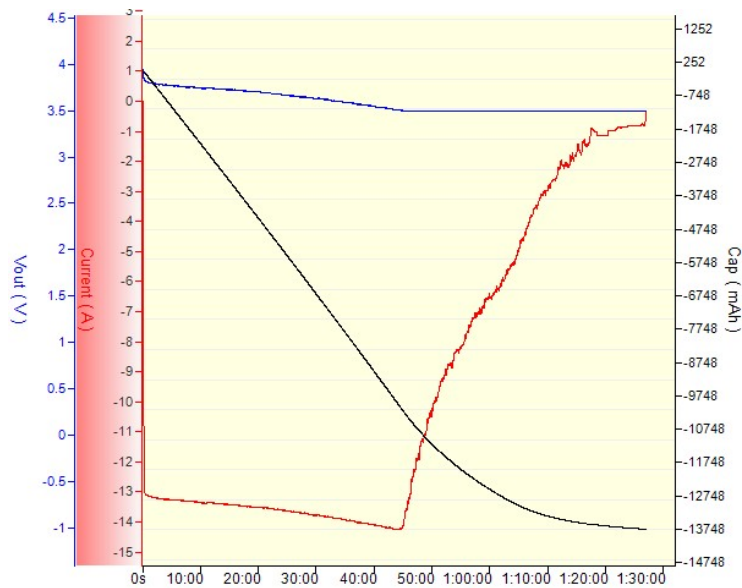
Cap [mAh]: 13 580 mAh

ΔT [°C]: 5 °C

I_{\max} [A]: 20.41 A

t [hh:mm:ss]: 03:04:16

Figura E.6: BAT2_#1_20-80_CHARGE_0.75C_3



U [V]: 3.497–3.947 V

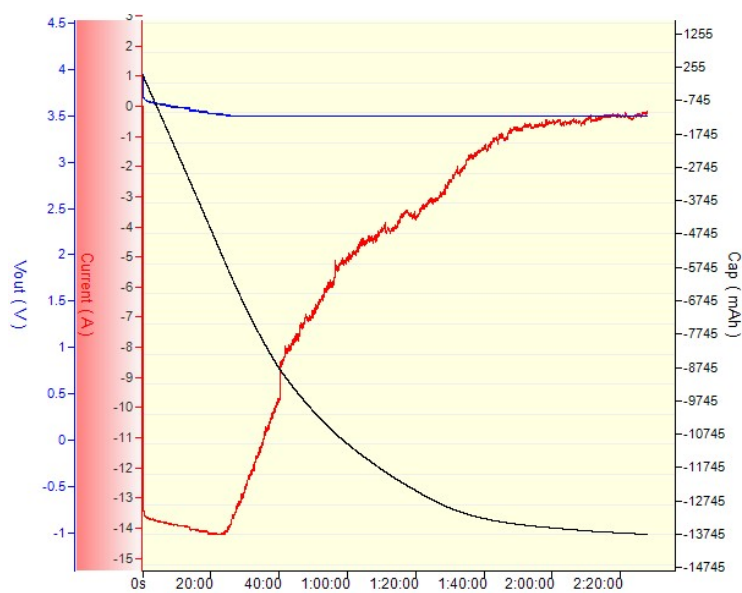
Cap [mAh]: 13 748 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 14.26 A

t [hh:mm:ss]: 01:27:03

Figura E.7: BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1



U [V]: 3.495–3.950 V

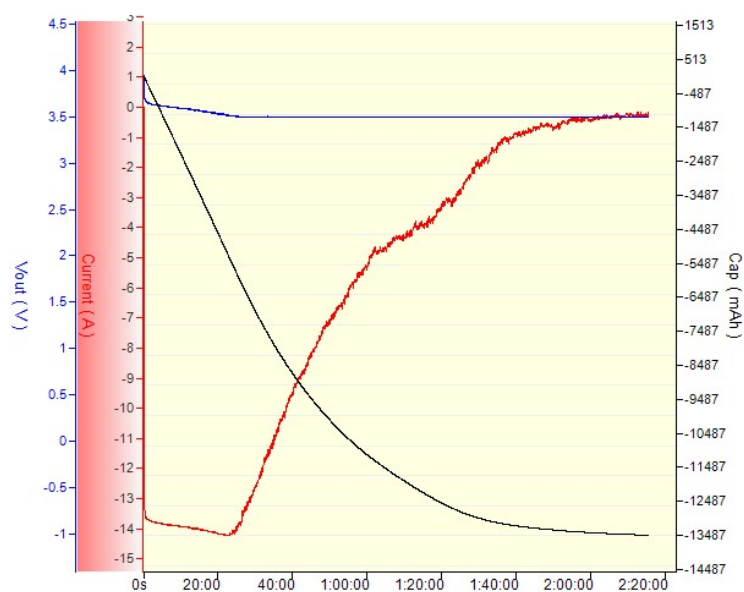
Cap [mAh]: 13 745 mAh

ΔT [°C]: 4 °C

I_{\max} [A]: 14.22 A

t [hh:mm:ss]: 02:27:59

Figura E.8: BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2



U [V]: 3.497–3.948 V

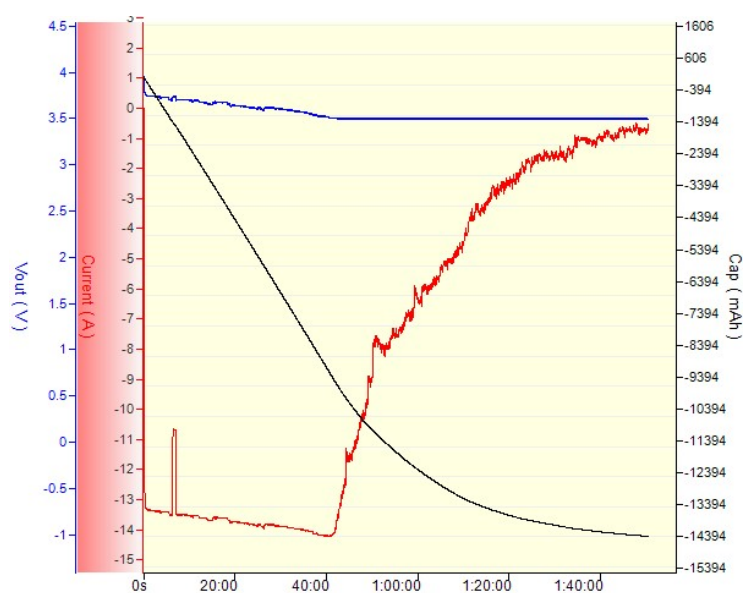
Cap [mAh]: 13 487 mAh

ΔT [°C]: 2 °C

I_{\max} [A]: 14.23 A

t [hh:mm:ss]: 02:15:22

Figura E.9: BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3



U [V]: 3.496–3.961 V

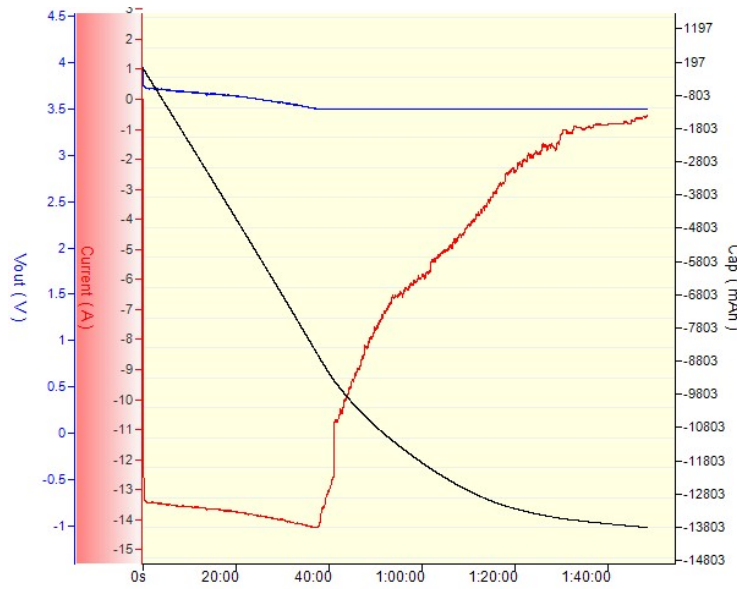
Cap [mAh]: 14 394 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 14.23 A

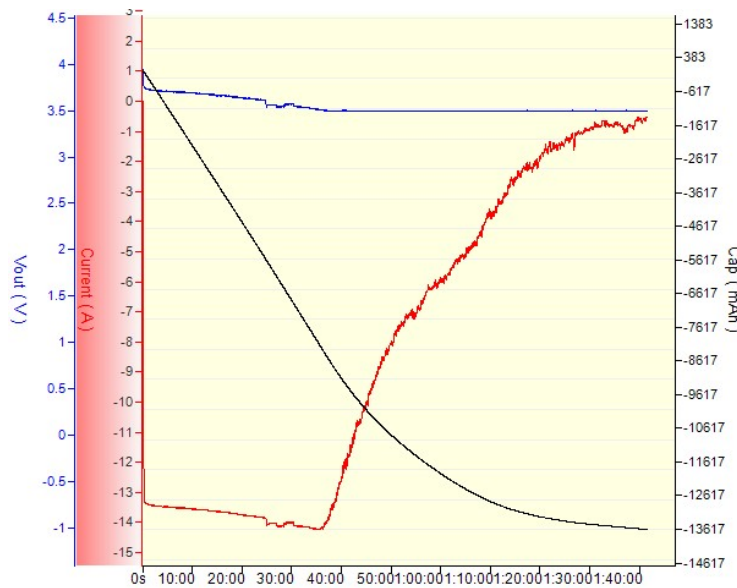
t [hh:mm:ss]: 01:50:22

Figura E.10: BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_1



U [V]: 3.496–3.952 V
 Cap [mAh]: 13 803 mAh
 ΔT [°C]: 4 °C
 I_{\max} [A]: 14.27 A
 t [hh:mm:ss]: 01:48:24

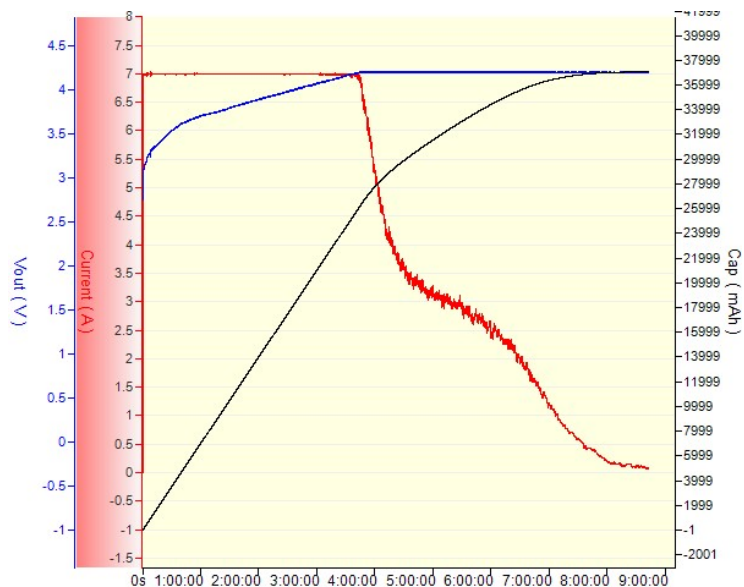
Figura E.11: BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_2



U [V]: 3.497–3.946 V
 Cap [mAh]: 13 617 mAh
 ΔT [°C]: 4 °C
 I_{\max} [A]: 14.24 A
 t [hh:mm:ss]: 01:41:31

Figura E.12: BAT2_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_3

E.2 0–100 % SoC



U [V]: 2.748–4.208 V

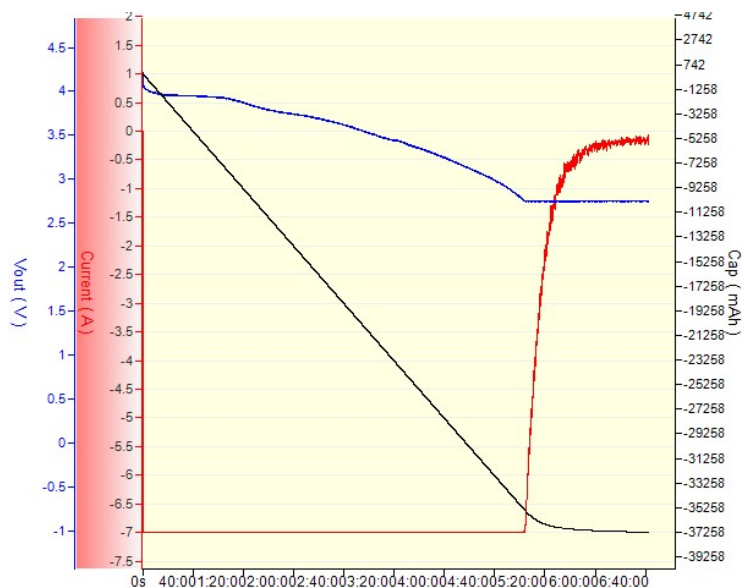
Cap [mAh]: 37 089 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 7.05 A

t [hh:mm:ss]: 08:43:08

Figura E.13: BAT2_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1



U [V]: 2.745–4.217 V

Cap [mAh]: 37 258 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 7 A

t [hh:mm:ss]: 06:42:35

Figura E.14: BAT2_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1

Apêndice F

Ensaios Realizados - Bateria 3

Este apêndice apresenta os registos gráficos dos ensaios realizados com a Bateria 3 - HC85120GC1-20. Cada gráfico corresponde a uma carga ou descarga, obtido com os equipamentos e métodos descritos no Capítulo 5. Os ensaios foram realizados em regime CC-CV, no caso das cargas, e em regime CP-CV no caso das descargas, com diferentes valores de C-rate. A tensão, a corrente e a capacidade acumulada foram continuamente monitorizadas ao longo do tempo.

Os gráficos encontram-se organizados com a imagem do ensaio à esquerda e um comentário técnico à direita, que inclui:

- U [V]: intervalo de tensão (tensão mínima e máxima registada);
- Cap [mAh]: capacidade medida (em valor absoluto);
- ΔT [°C]: variação de temperatura;
- I_{max} [A]: corrente máxima aplicada (em valor absoluto);
- t [hh:mm:ss]: duração do ensaio.

Cada gráfico está identificado, seguindo a seguinte nomenclatura:

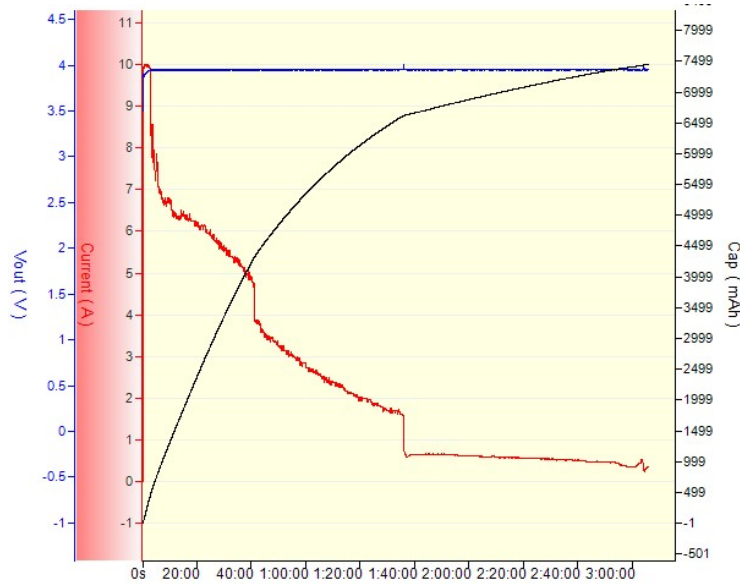
BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3

onde:

- BAT3 é o identificador da Bateria 3;
- #1 indica o âmbito do caso de estudo realizado (se Caso de Estudo #1 ou #2);
- 20-80 refere-se à faixa de SoC do ciclo realizado, se parcial (20-80) ou se completo (0-100);
- DISCHARGE indica um ensaio de descarga, CHARGE se carga;
- 1.0C identifica o C-rate utilizado no ensaio;
- 3 refere-se ao número do ensaio (1, 2 ou 3 dado que foram realizados 3 ensaios para cada situação).

Este conjunto de dados complementa os resultados apresentados no Capítulo 6, permitindo uma análise visual da resposta desta bateria sob as diferentes condições testadas.

F.1 20–80 % SoC



U [V]: 3.503–4.011 V

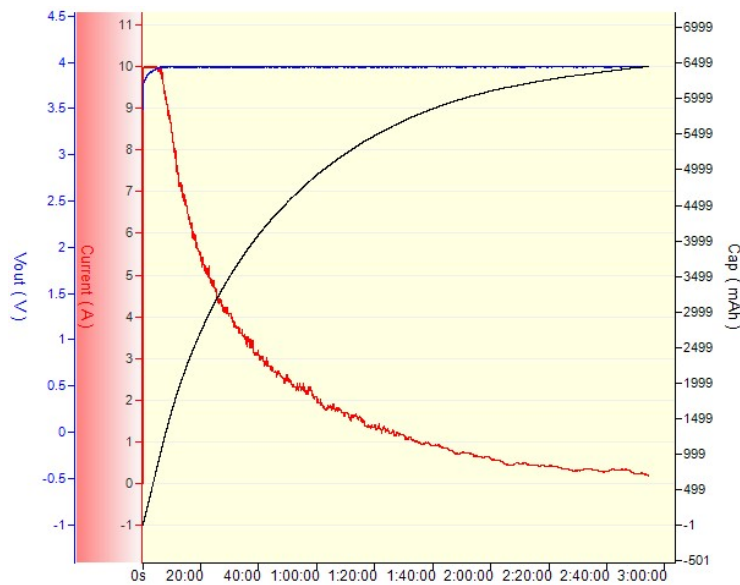
Cap [mAh]: 7447 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 10 A

t [hh:mm:ss]: 03:05:48

Figura F.1: BAT3_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1



U [V]: 3.496–3.959 V

Cap [mAh]: 6451 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{\max} [A]: 10 A

t [hh:mm:ss]: 02:54:11

Figura F.2: BAT3_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2

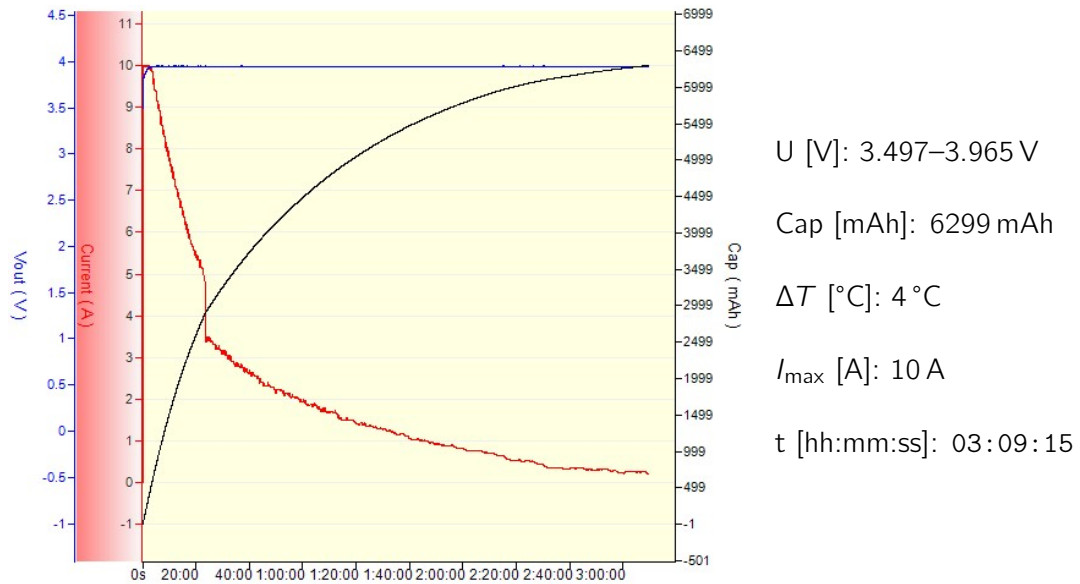


Figura F.3: BAT3_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3

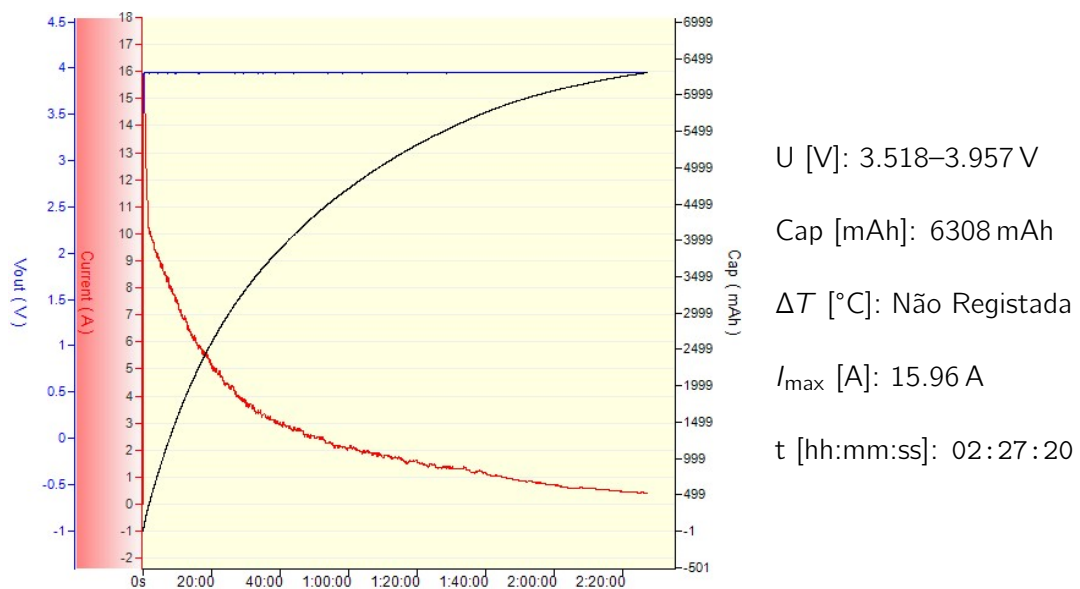
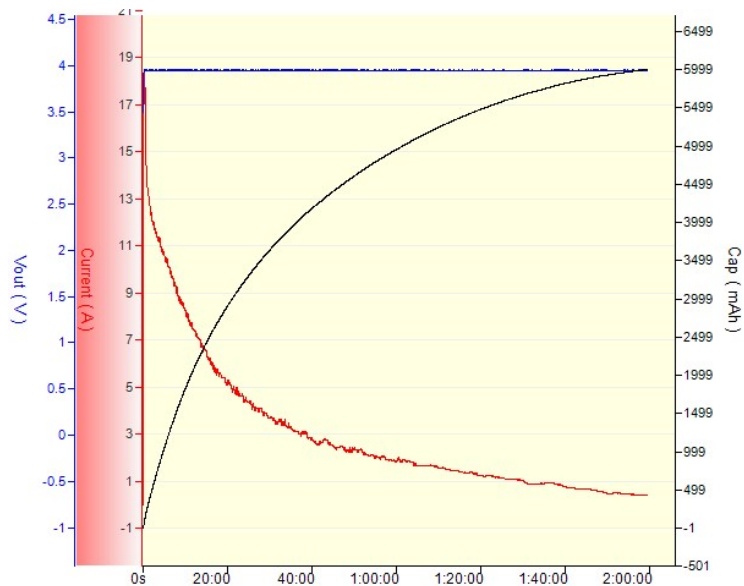


Figura F.4: BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.0C_1



U [V]: 3.500–3.964 V

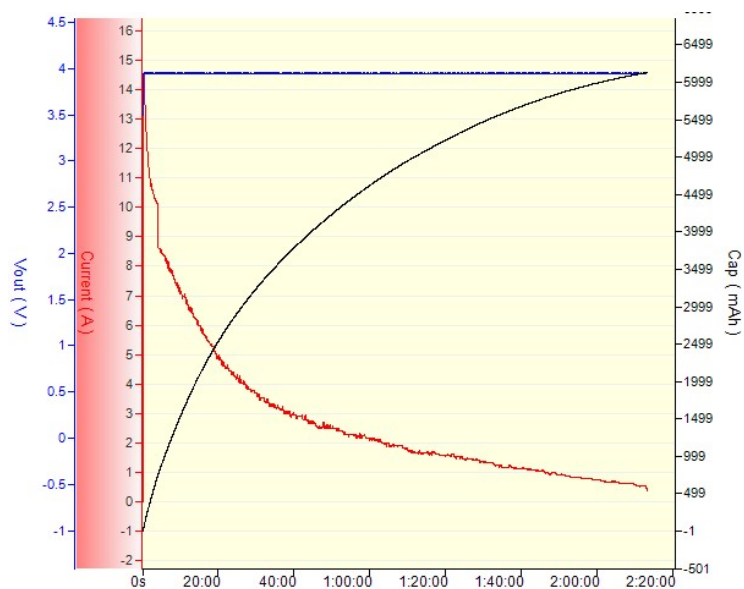
Cap [mAh]: 6000 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{max} [A]: 18.49 A

t [hh:mm:ss]: 01:59:22

Figura F.5: BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.0C_2



U [V]: 3.498–3.963 V

Cap [mAh]: 6128 mAh

ΔT [°C]: 4 °C

I_{max} [A]: 14.58 A

t [hh:mm:ss]: 02:13:22

Figura F.6: BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.0C_3

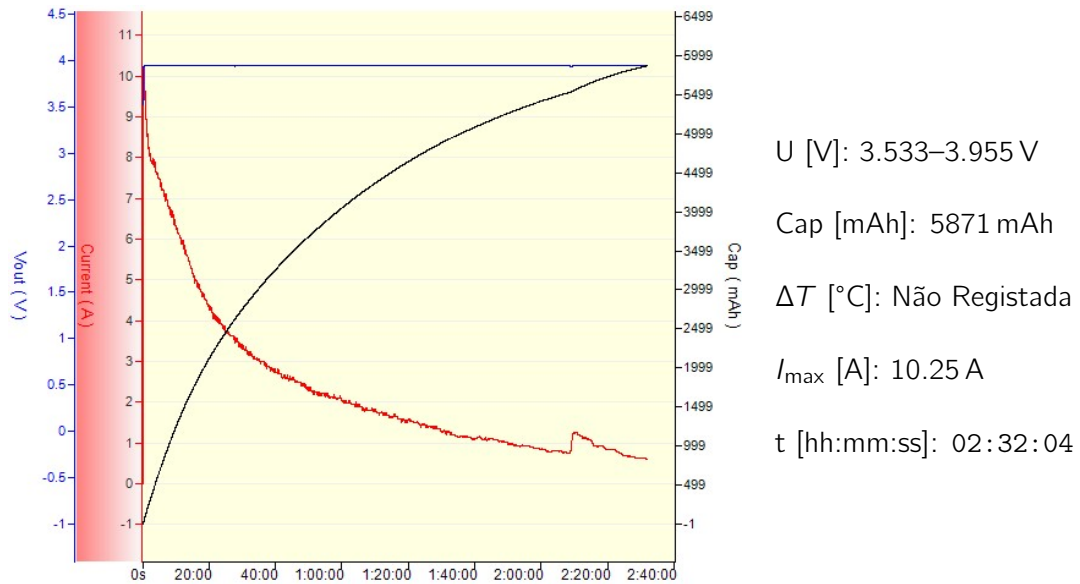


Figura F.7: BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.5C_1

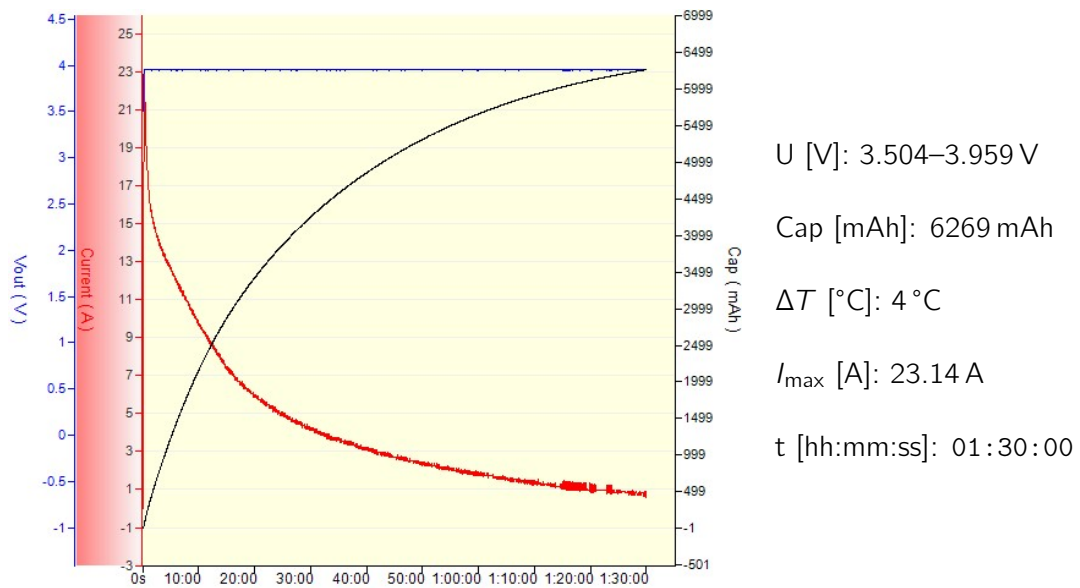
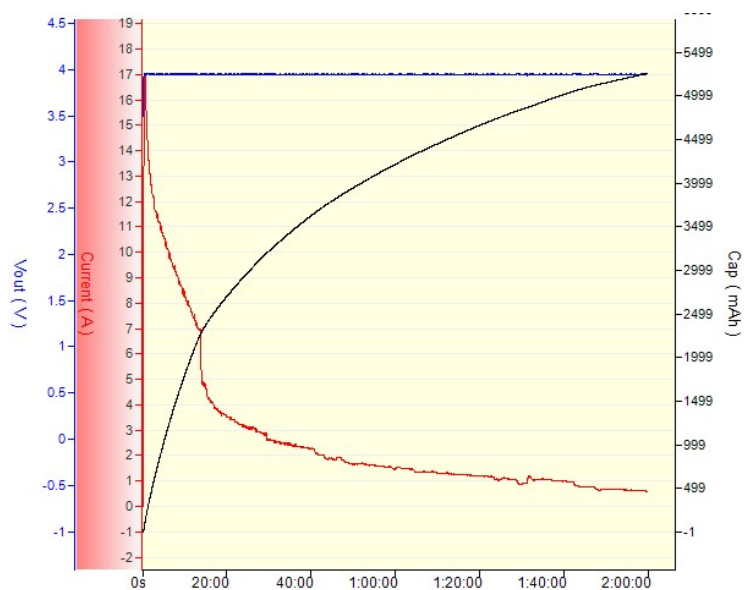


Figura F.8: BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.5C_2



U [V]: 3.499–3.963 V

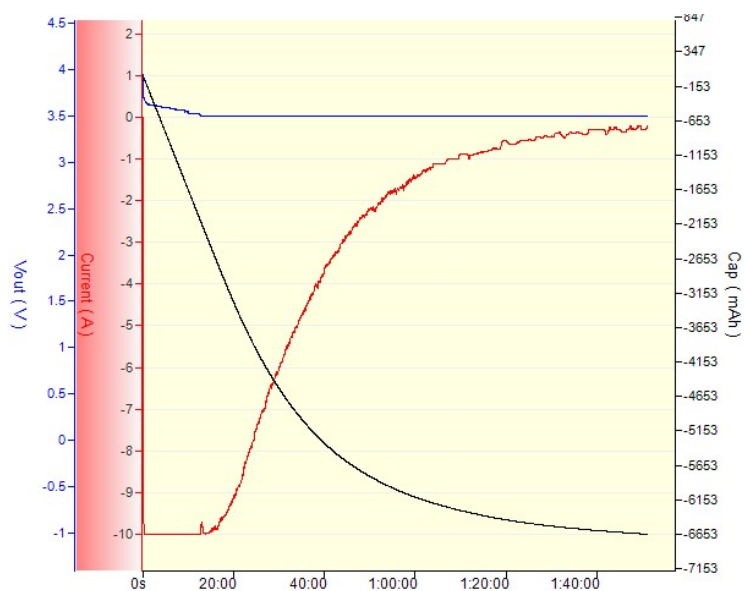
Cap [mAh]: 5255 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{max} [A]: 17.05 A

t [hh:mm:ss]: 01:59:40

Figura F.9: BAT3_#1_20-80_CHARGE_1.5C_3



U [V]: 3.498–3.954 V

Cap [mAh]: 6653 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 10 A

t [hh:mm:ss]: 01:50:59

Figura F.10: BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1

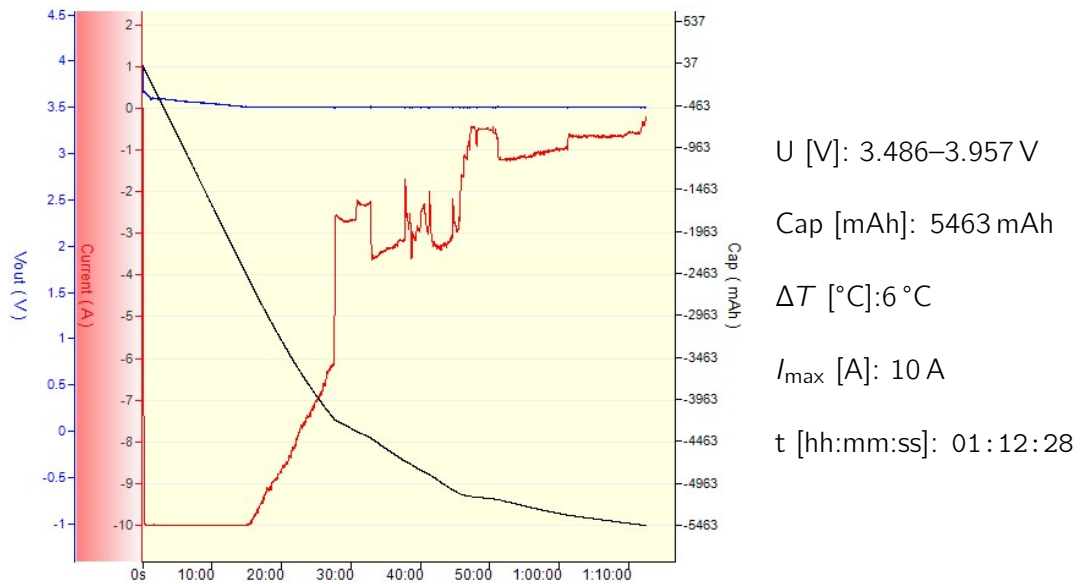


Figura F.11: BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2

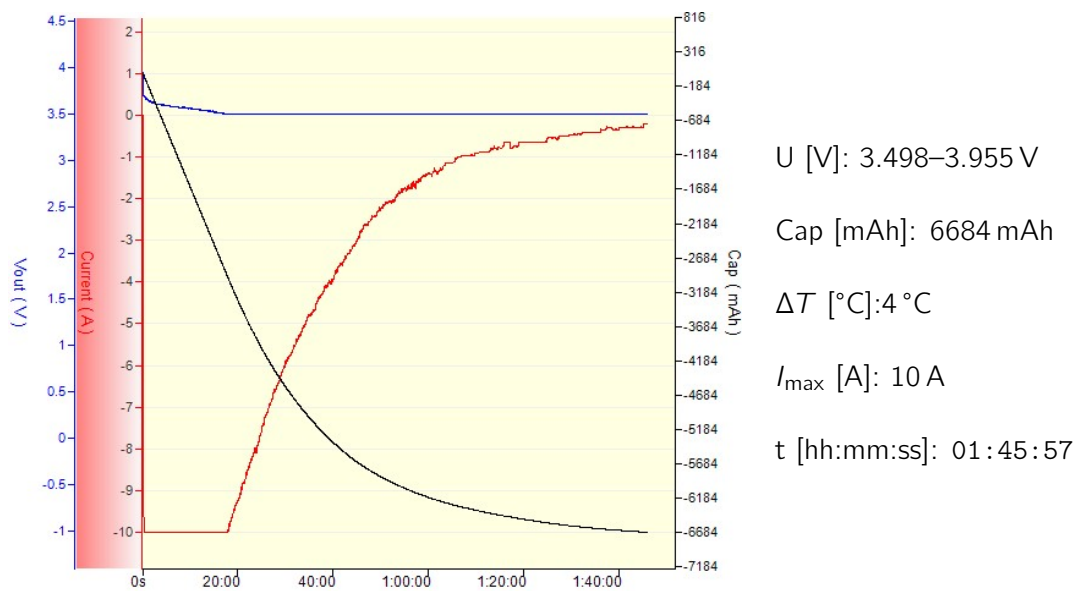
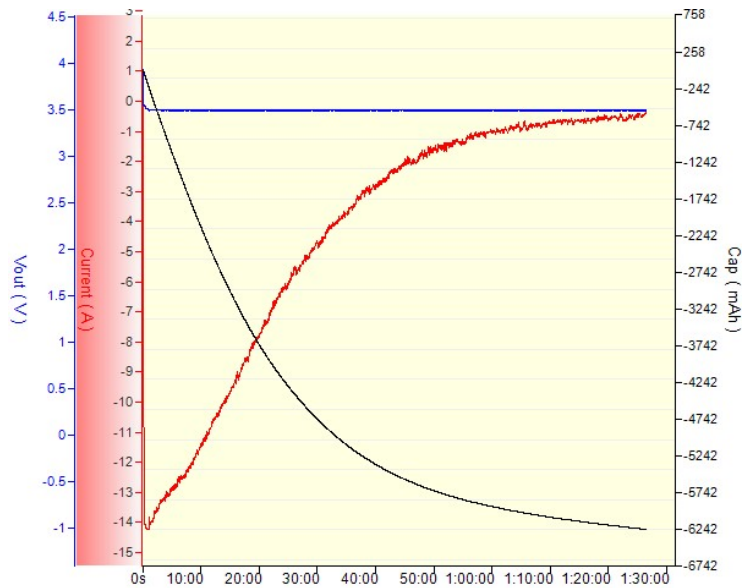


Figura F.12: BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3



U [V]: 3.496–3.941 V

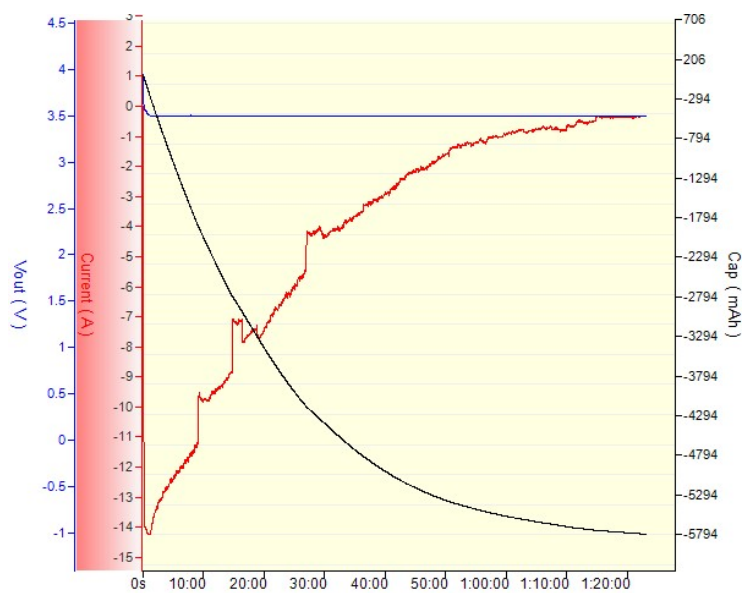
Cap [mAh]: 6242 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 14.24 A

t [hh:mm:ss]: 01:26:31

Figura F.13: BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_1



U [V]: 3.491–3.949 V

Cap [mAh]: 5794 mAh

ΔT [°C]: 4 °C

I_{\max} [A]: 14.25 A

t [hh:mm:ss]: 01:23:07

Figura F.14: BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_2

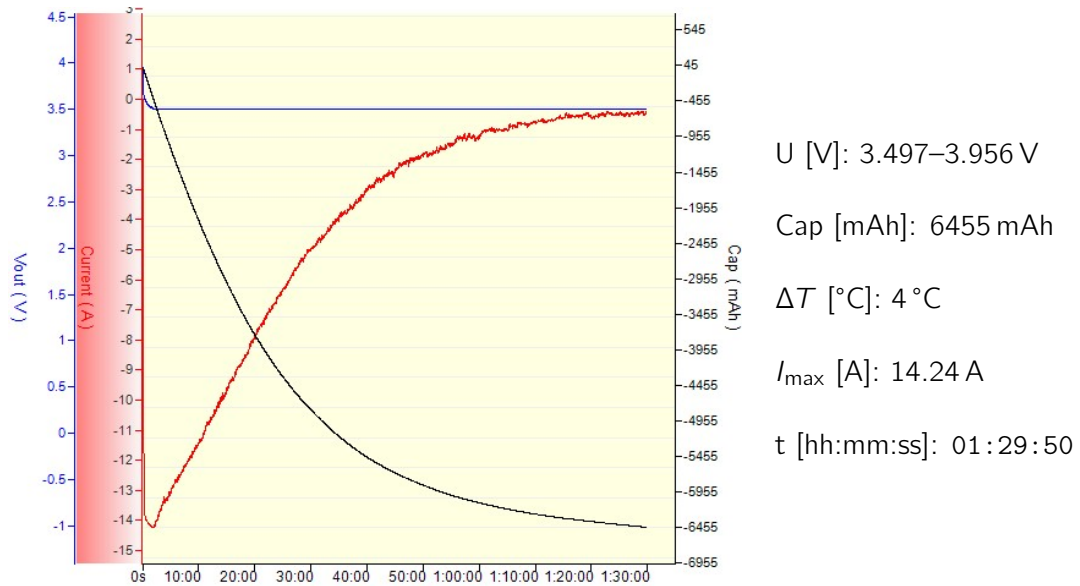


Figura F.15: BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3

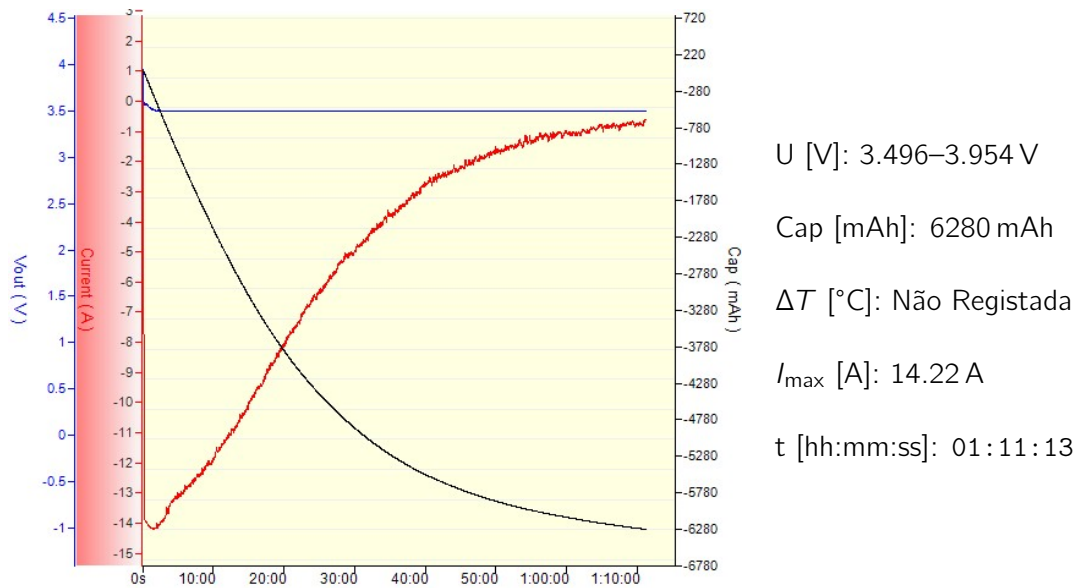
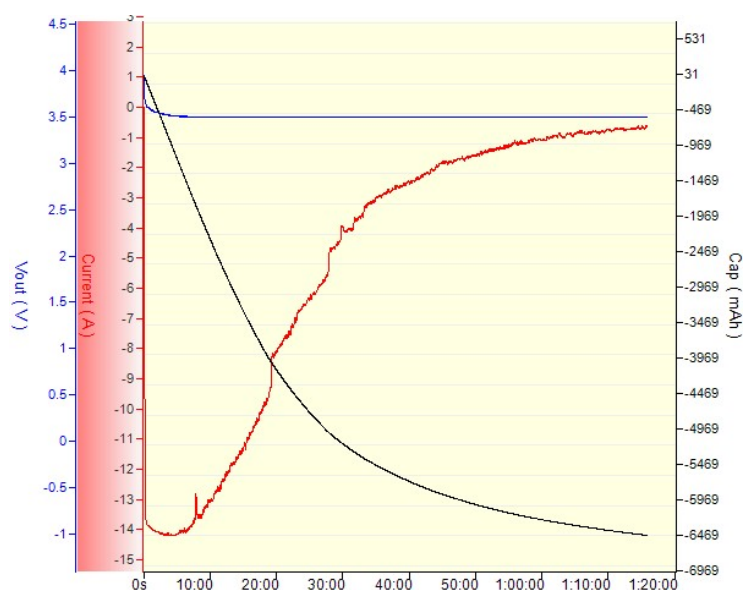


Figura F.16: BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.5C_1



U [V]: 3.496–3.951 V

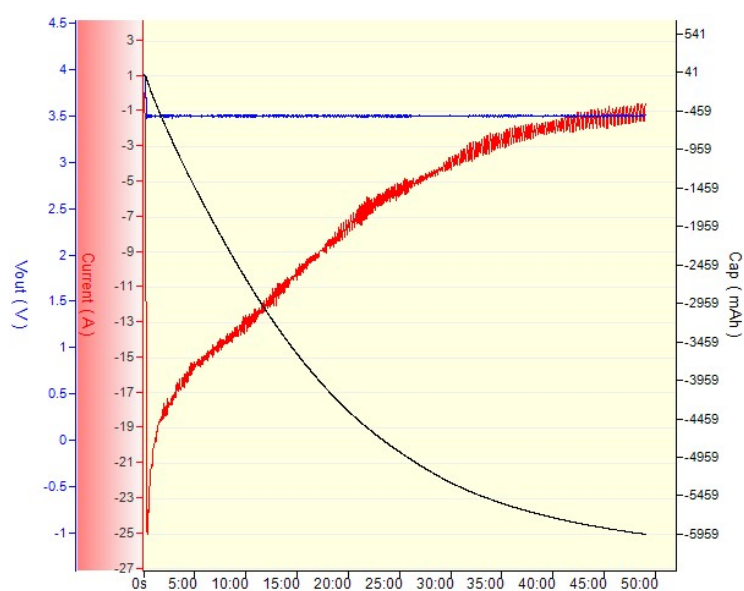
Cap [mAh]: 6469 mAh

ΔT [°C]: 7 °C

I_{\max} [A]: 14.21 A

t [hh:mm:ss]: 01:15:49

Figura F.17: BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.5C_2



U [V]: 3.472–3.951 V

Cap [mAh]: 5959 mAh

ΔT [°C]: 5 °C

I_{\max} [A]: 25.06 A

t [hh:mm:ss]: 00:49:00

Figura F.18: BAT3_#1_20-80_DISCHARGE_1.5C_3

F.2 0–100 % SoC

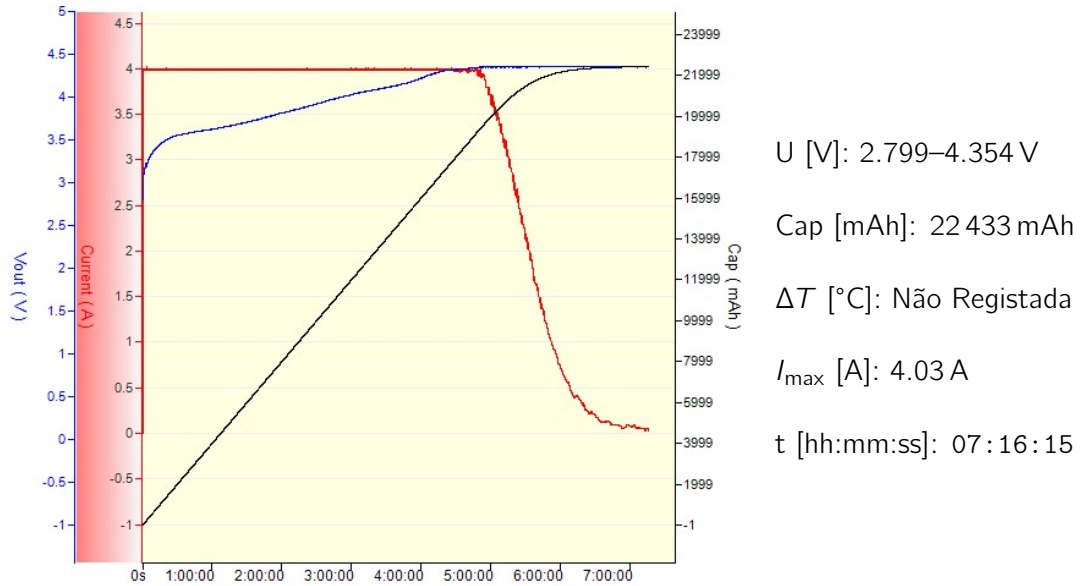


Figura F.19: BAT3_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1

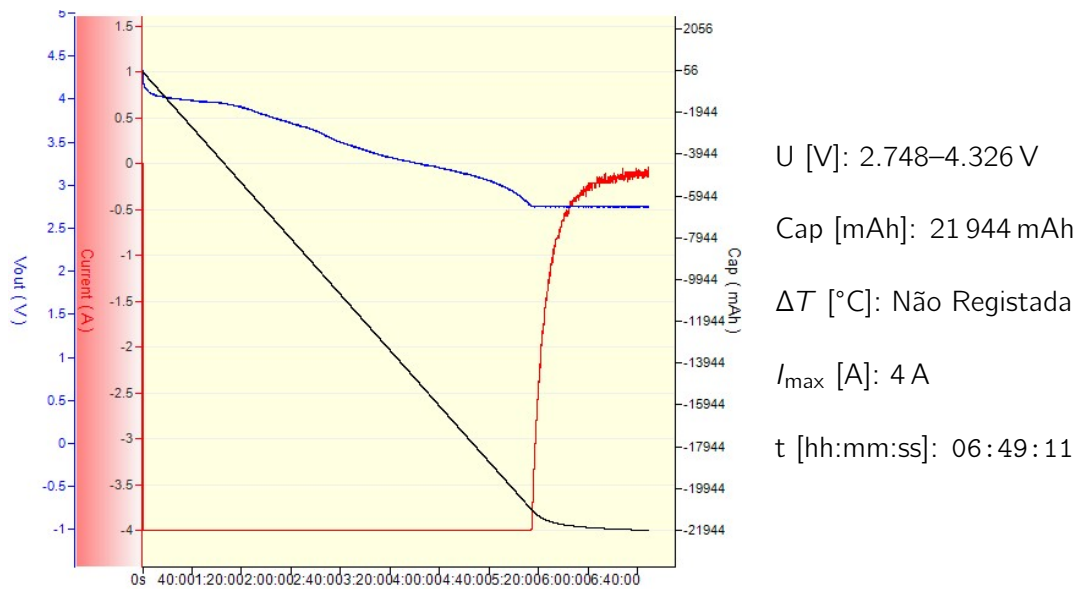


Figura F.20: BAT3_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1

Apêndice G

Ensaios Realizados - Bateria 4

Este apêndice apresenta os registos gráficos dos ensaios realizados com a Bateria 4 - Exide ETZ14-BS. Cada gráfico corresponde a uma carga ou descarga, obtido com os equipamentos e métodos descritos no Capítulo 5. Os ensaios foram realizados em regime CC-CV, no caso das cargas, e em regime CP-CV no caso das descargas, com diferentes valores de C-rate. A tensão, a corrente e a capacidade acumulada foram continuamente monitorizadas ao longo do tempo.

Os gráficos encontram-se organizados com a imagem do ensaio à esquerda e um comentário técnico à direita, que inclui:

- U [V]: intervalo de tensão (tensão mínima e máxima registada);
- Cap [mAh]: capacidade medida (em valor absoluto);
- ΔT [°C]: variação de temperatura;
- I_{max} [A]: corrente máxima aplicada (em valor absoluto);
- t [hh:mm:ss]: duração do ensaio.

Cada gráfico está identificado, seguindo a seguinte nomenclatura:

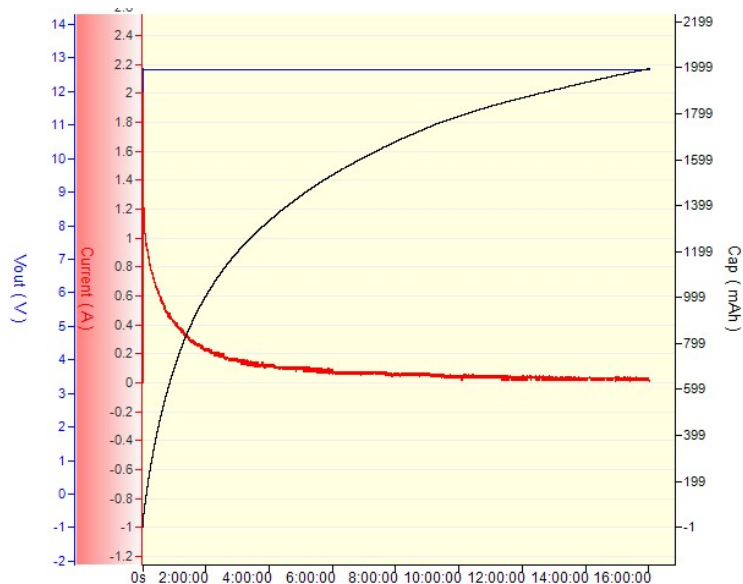
BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3

onde:

- BAT4 é o identificador da Bateria 4;
- #1 indica o âmbito do caso de estudo realizado (Caso de Estudo #1);
- 20-80 refere-se à faixa de SoC do ciclo realizado, se parcial (20-80) ou se completo (0-100);
- DISCHARGE indica um ensaio de descarga, CHARGE se carga;
- 0.5C identifica o C-rate utilizado no ensaio;
- 3 refere-se ao número do ensaio (1, 2 ou 3 dado que foram realizados 3 ensaios para cada situação).

Este conjunto de dados complementa os resultados apresentados no Capítulo 6, permitindo uma análise visual da resposta desta bateria sob as diferentes condições testadas.

G.1 20–80 % SoC



U [V]: 12.002–12.671 V

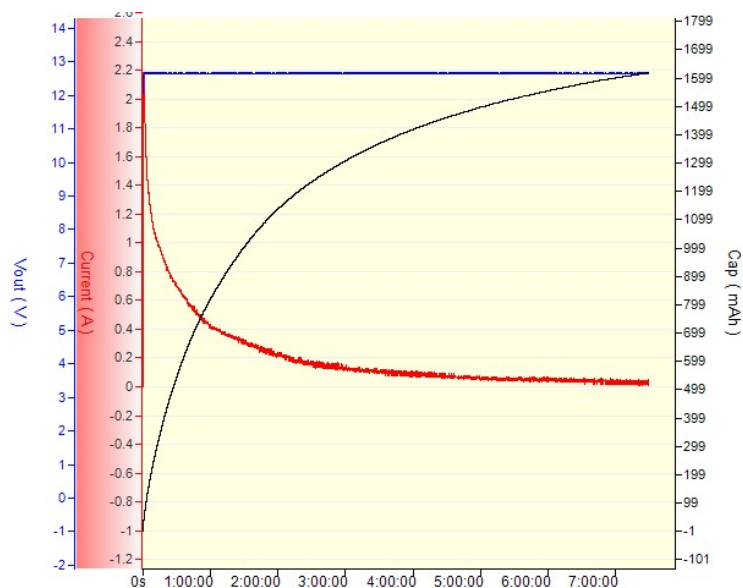
Cap [mAh]: 1744 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 2.17 A

t [hh:mm:ss]: 09:06:05

Figura G.1: BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.2C_1



U [V]: 12.074–12.664 V

Cap [mAh]: 1618 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 2.19 A

t [hh:mm:ss]: 07:29:19

Figura G.2: BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.2C_2

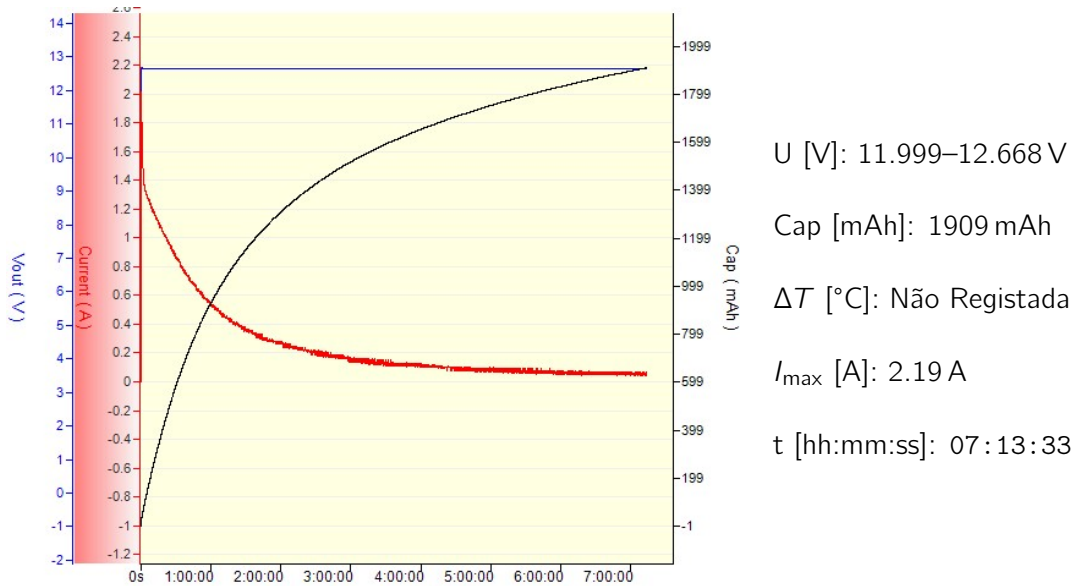


Figura G.3: BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.2C_3

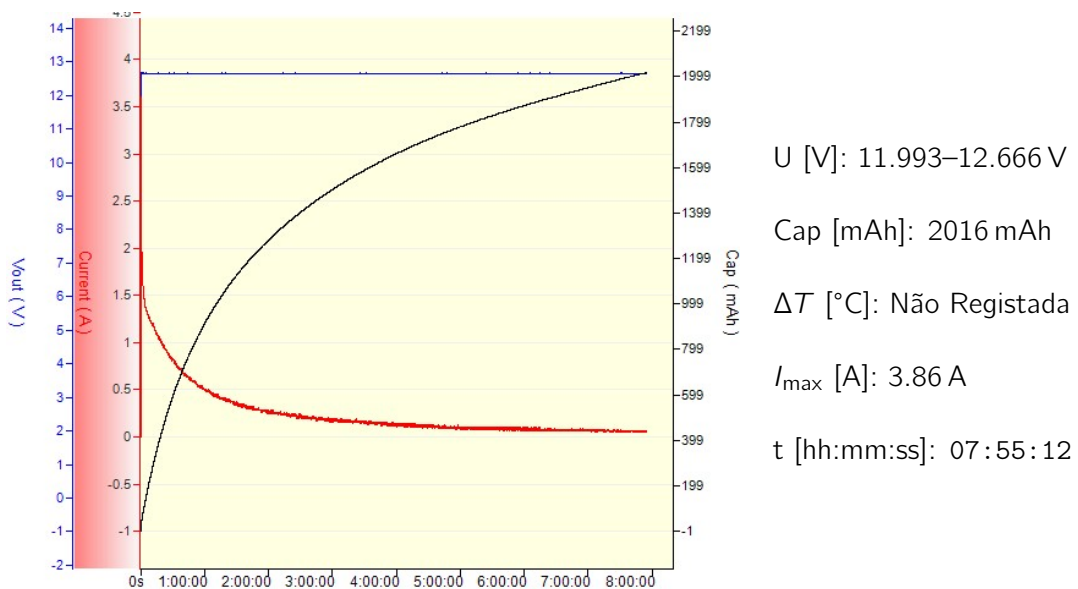
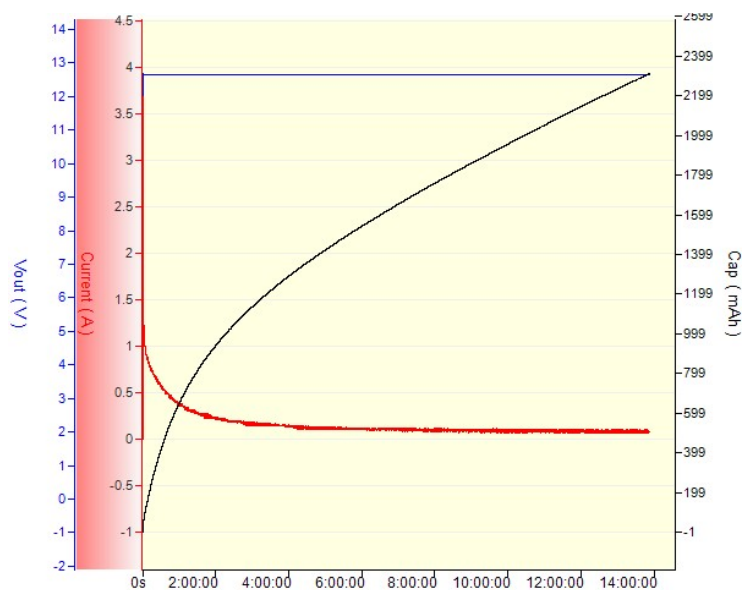


Figura G.4: BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1



U [V]: 12.040–12.672 V

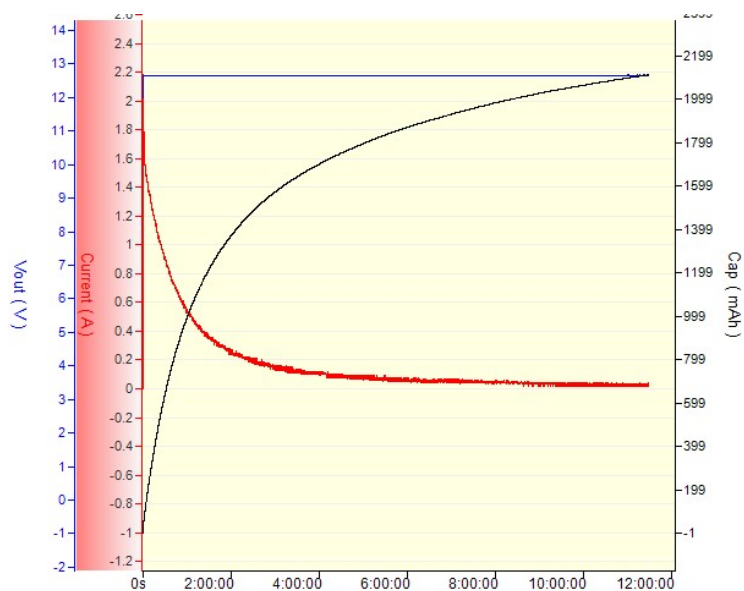
Cap [mAh]: 1868 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 3.93 A

t [hh:mm:ss]: 09:06:05

Figura G.5: BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2



U [V]: 12.000–12.664 V

Cap [mAh]: 2029 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 2.19 A

t [hh:mm:ss]: 09:06:05

Figura G.6: BAT4_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3

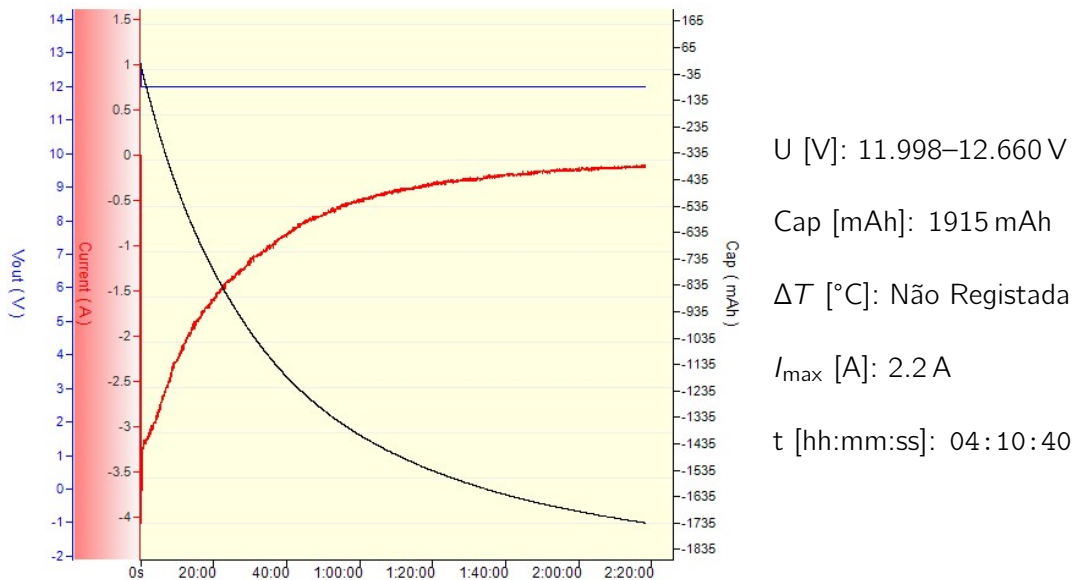


Figura G.7: BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.2C_1

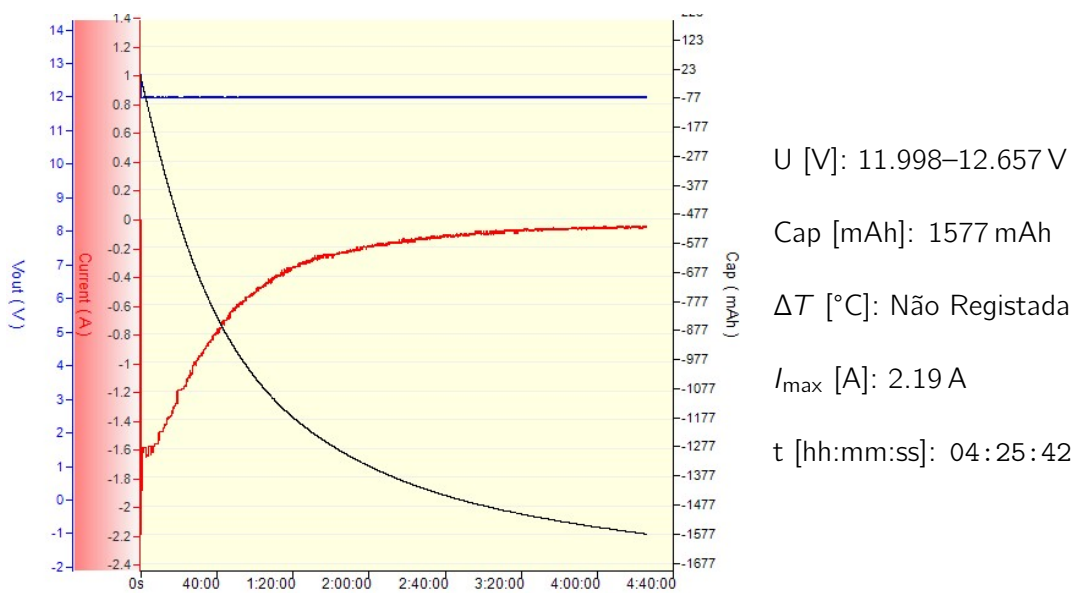
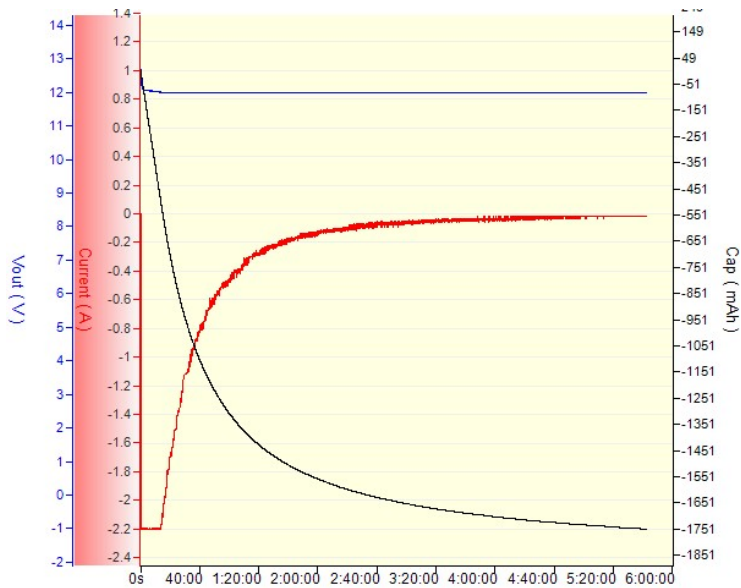


Figura G.8: BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.2C_2



U [V]: 11.993–12.665 V

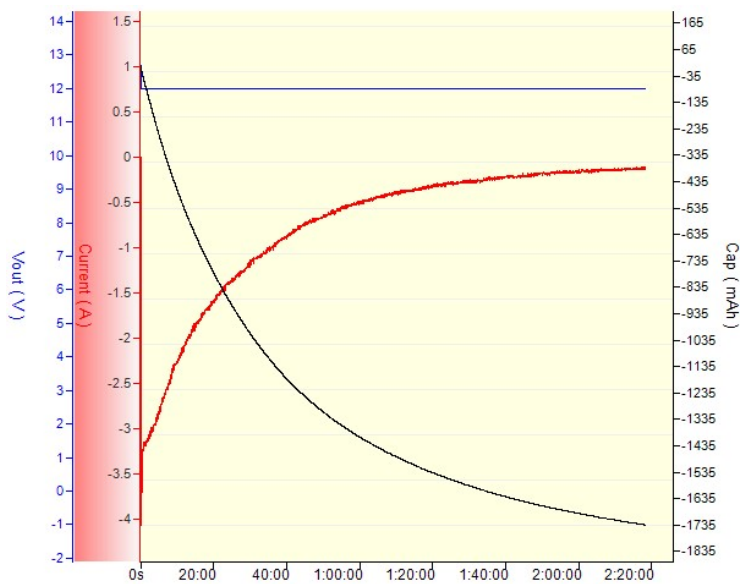
Cap [mAh]: 1751 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 2.2 A

t [hh:mm:ss]: 05:42:33

Figura G.9: BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.2C_3



U [V]: 11.998–12.668 V

Cap [mAh]: 1735 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{\max} [A]: 4.06 A

t [hh:mm:ss]: 02:18:19

Figura G.10: BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1

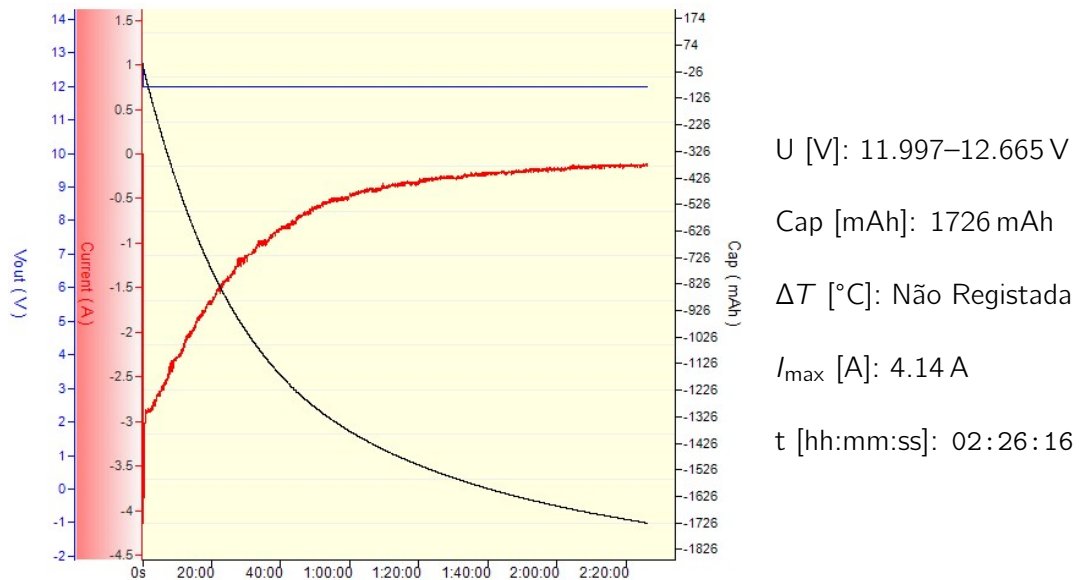


Figura G.11: BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2

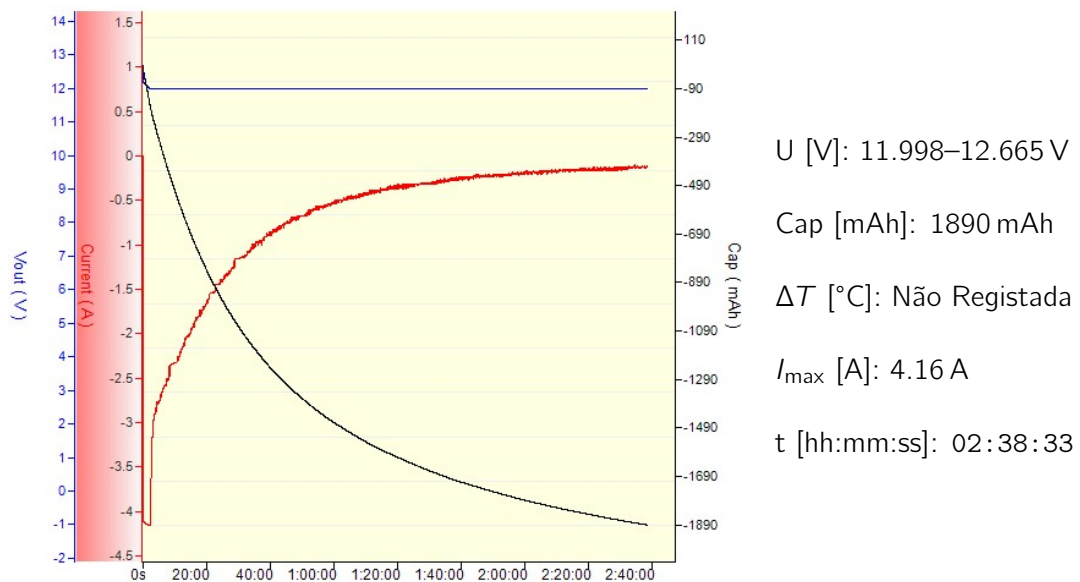


Figura G.12: BAT4_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3

Apêndice H

Ensaios Realizados - Bateria 5

Este apêndice apresenta os registos gráficos dos ensaios realizados com a Bateria 5 - Foredeary FDE-Li-24-36-NL. Cada gráfico corresponde a uma carga ou descarga, obtido com os equipamentos e métodos descritos no Capítulo 5. Os ensaios foram realizados em regime CC-CV, no caso das cargas, e em regime CP-CV no caso das descargas, com diferentes valores de C-rate. A tensão, a corrente e a capacidade acumulada foram continuamente monitorizadas ao longo do tempo.

Os gráficos encontram-se organizados com a imagem do ensaio à esquerda e um comentário técnico à direita, que inclui:

- U [V]: intervalo de tensão;
- ΔV_{cell} [V]: desvio máximo entre a tensão das células da bateria;
- Cap [mAh]: capacidade medida;
- ΔT [°C]: variação de temperatura;
- I_{max} [A]: corrente máxima aplicada;
- t [hh:mm:ss]: duração do ensaio.

Cada gráfico está identificado, seguindo a seguinte nomenclatura:

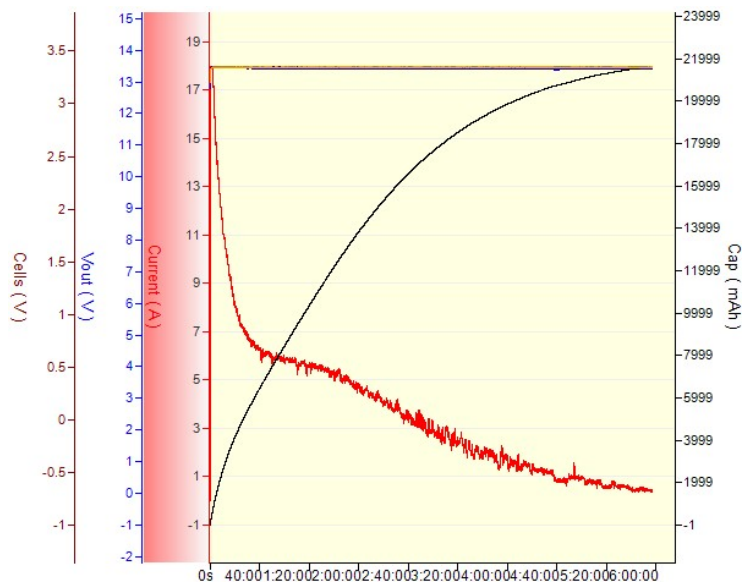
BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3

onde:

- BAT5 é o identificador da Bateria 5;
- #1 indica o âmbito do caso de estudo realizado (se Caso de Estudo #1 ou #2);
- 20-80 refere-se à faixa de SoC do ciclo realizado, se parcial (20-80) ou se completo (0-100);
- DISCHARGE indica um ensaio de descarga, CHARGE se carga;
- 1.0C identifica o C-rate utilizado no ensaio;
- 3 refere-se ao número do ensaio (1, 2 ou 3 dado que foram realizados 3 ensaios para cada situação).

Este conjunto de dados complementa os resultados apresentados no Capítulo 6, permitindo uma análise visual da resposta desta bateria sob as diferentes condições testadas.

H.1 20–80 % SoC



U [V]: 12.809–13.490 V

ΔV_{cell} [V]: 0.011 V

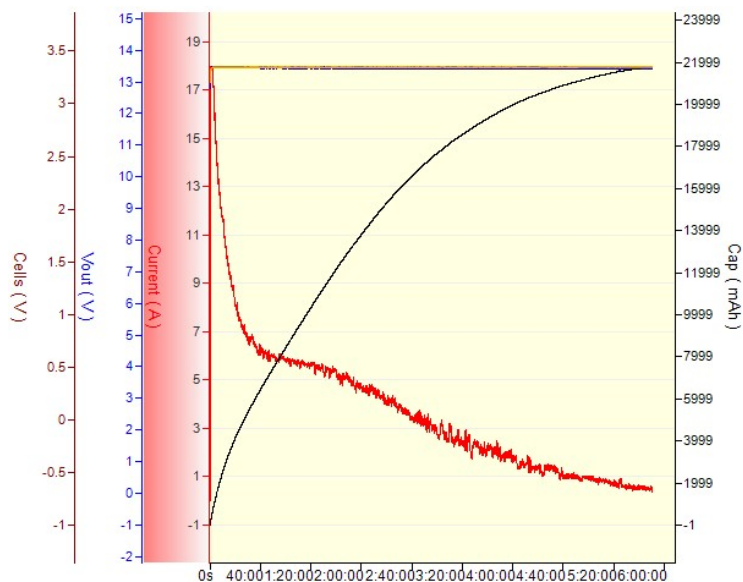
Cap [mAh]: 21 640 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 18 A

t [hh:mm:ss]: 05:56:56

Figura H.1: BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1



U [V]: 12.807–13.488 V

ΔV_{cell} [V]: 0.016 V

Cap [mAh]: 21 799 mAh

ΔT [°C]: 5 °C

I_{max} [A]: 18 A

t [hh:mm:ss]: 05:20:22

Figura H.2: BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2

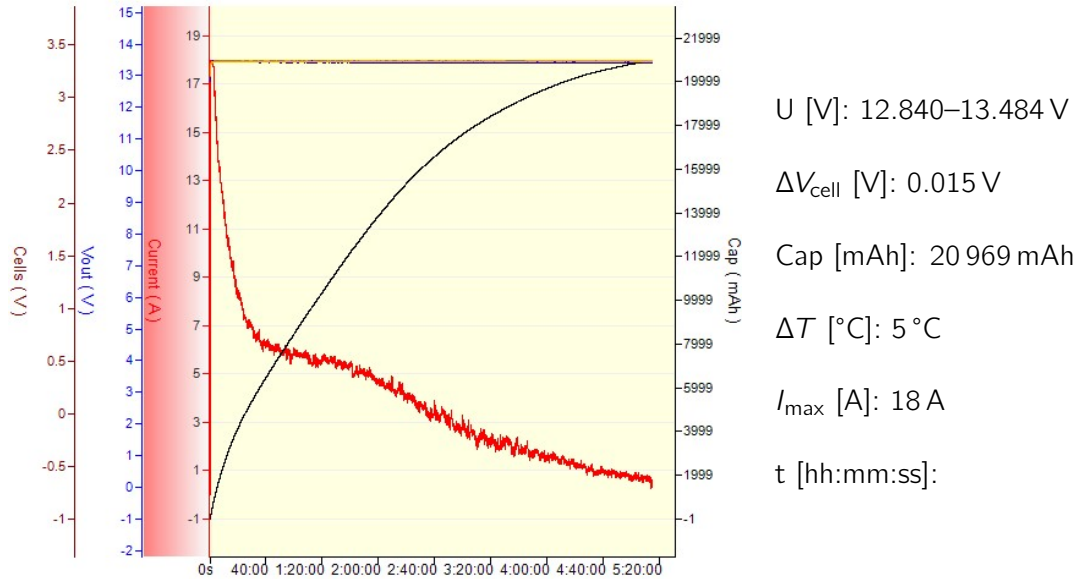


Figura H.3: BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3

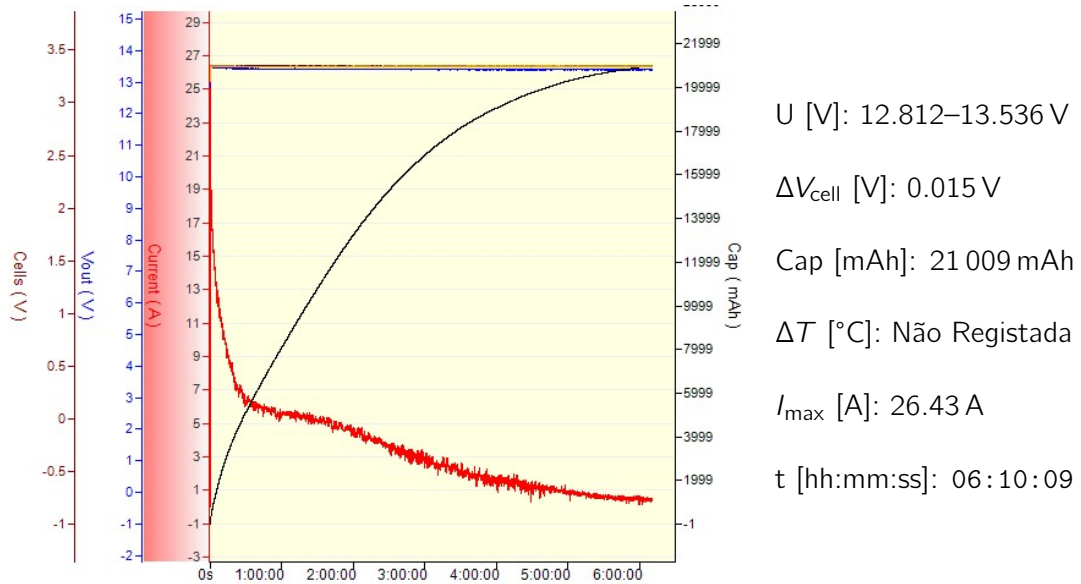
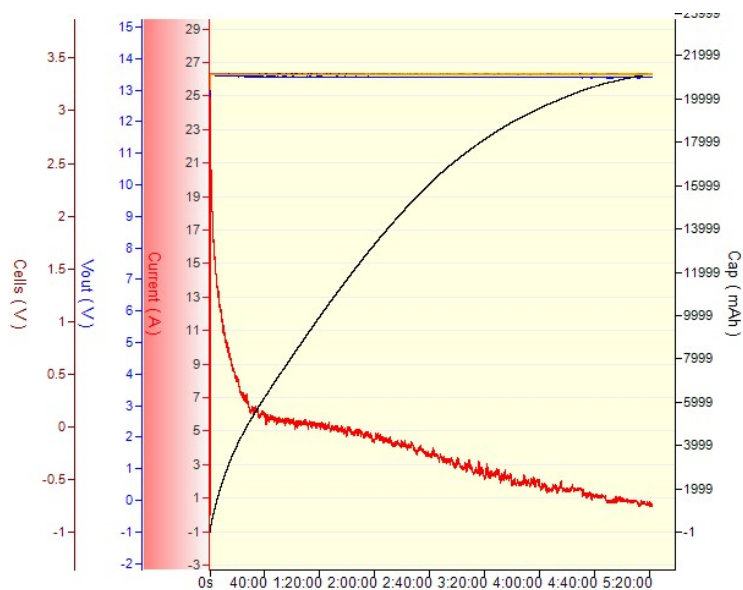


Figura H.4: BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.75C_1



U [V]: 12.805–13.534 V

ΔV_{cell} [V]: 0.009 V

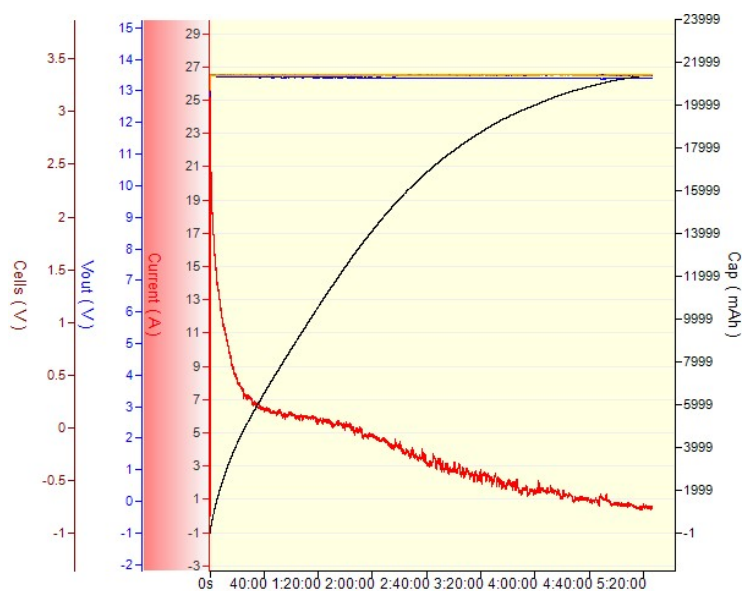
Cap [mAh]: 21 174 mAh

ΔT [°C]: 5 °C

I_{max} [A]: 26.36 A

t [hh:mm:ss]: 05:21:43

Figura H.5: BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.75C_2



U [V]: 12.821–13.530 V

ΔV_{cell} [V]: 0.014 V

Cap [mAh]: 21 447 mAh

ΔT [°C]: 4 °C

I_{max} [A]: 26.57 A

t [hh:mm:ss]: 05:26:16

Figura H.6: BAT5_#1_20-80_CHARGE_0.75C_3

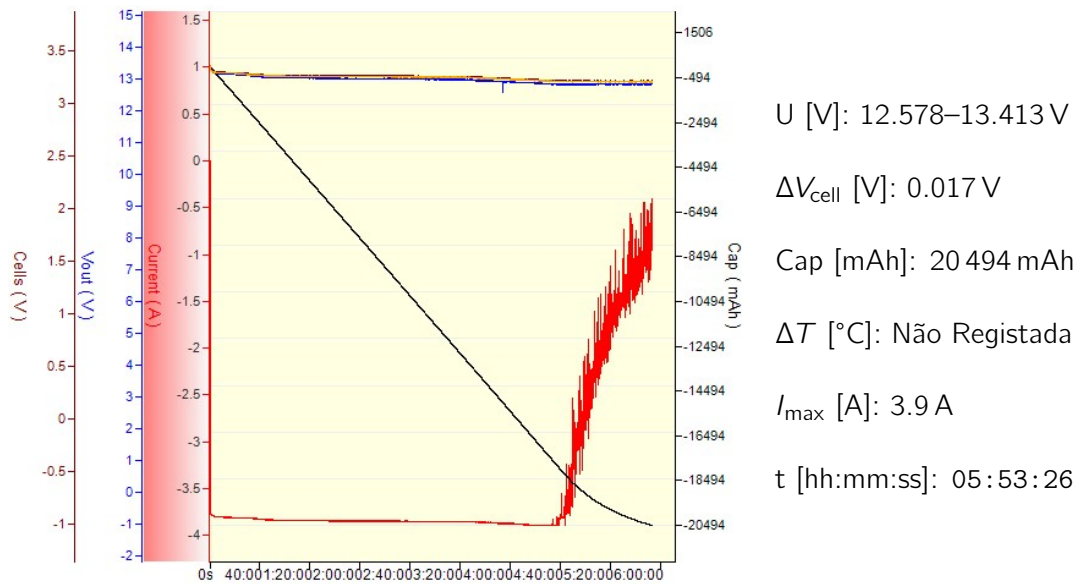


Figura H.7: BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1

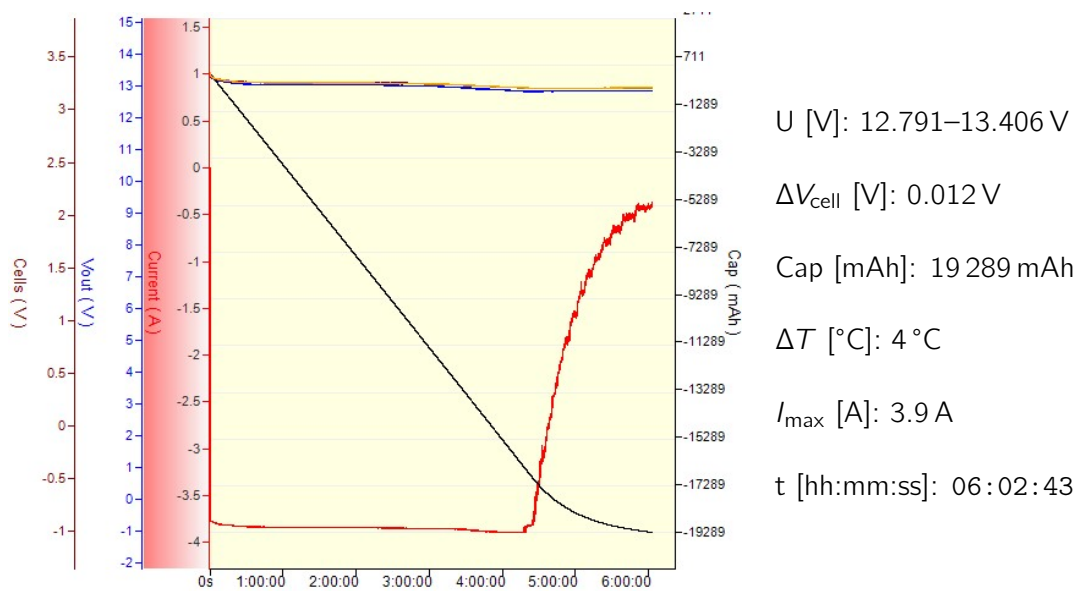
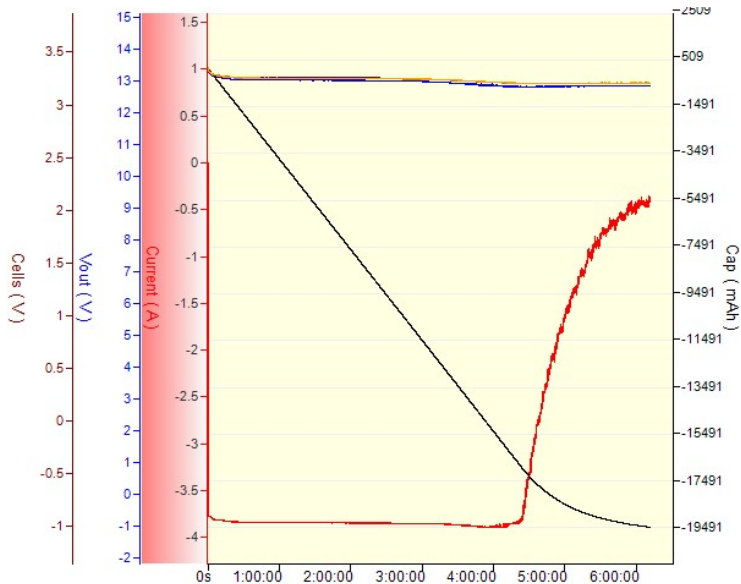


Figura H.8: BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2



U [V]: 12.788–13.412 V

ΔV_{cell} [V]: 0.017 V

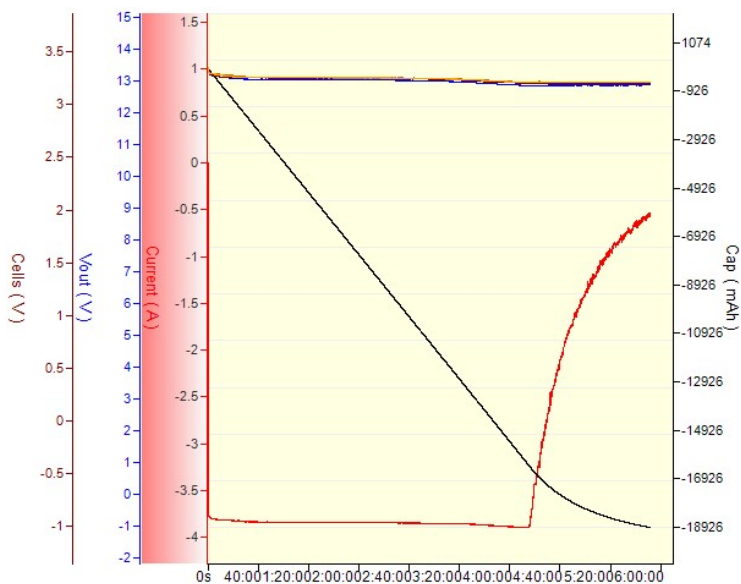
Cap [mAh]: 19 491 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{max} [A]: 3.9 A

t [hh:mm:ss]: 06:11:43

Figura H.9: BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3



U [V]: 12.830–13.409 V

ΔV_{cell} [V]: 0.025 V

Cap [mAh]: 18 926 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 3.9 A

t [hh:mm:ss]: 05:51:26

Figura H.10: BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_1

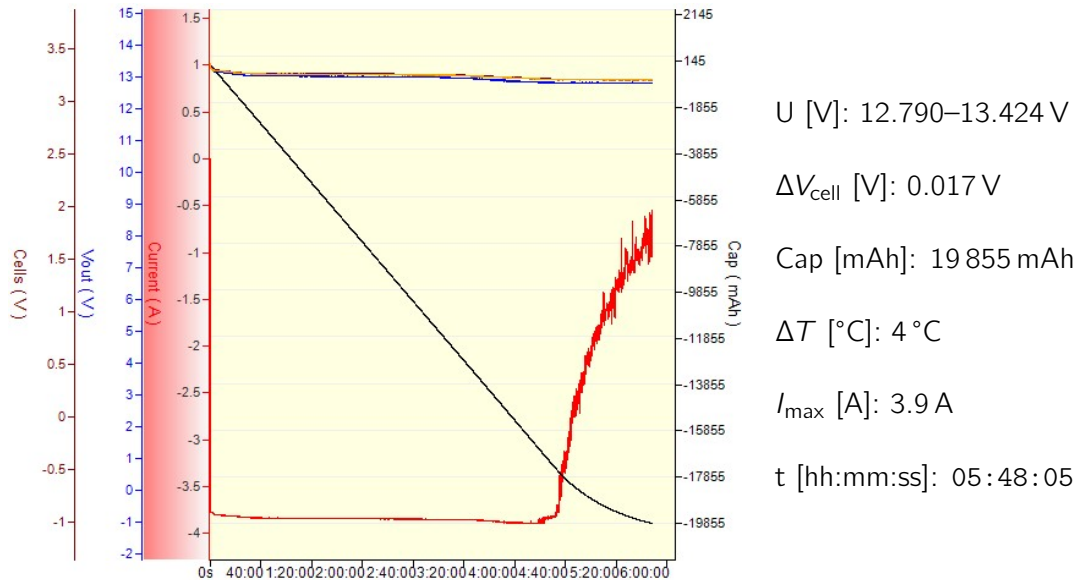


Figura H.11: BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_2

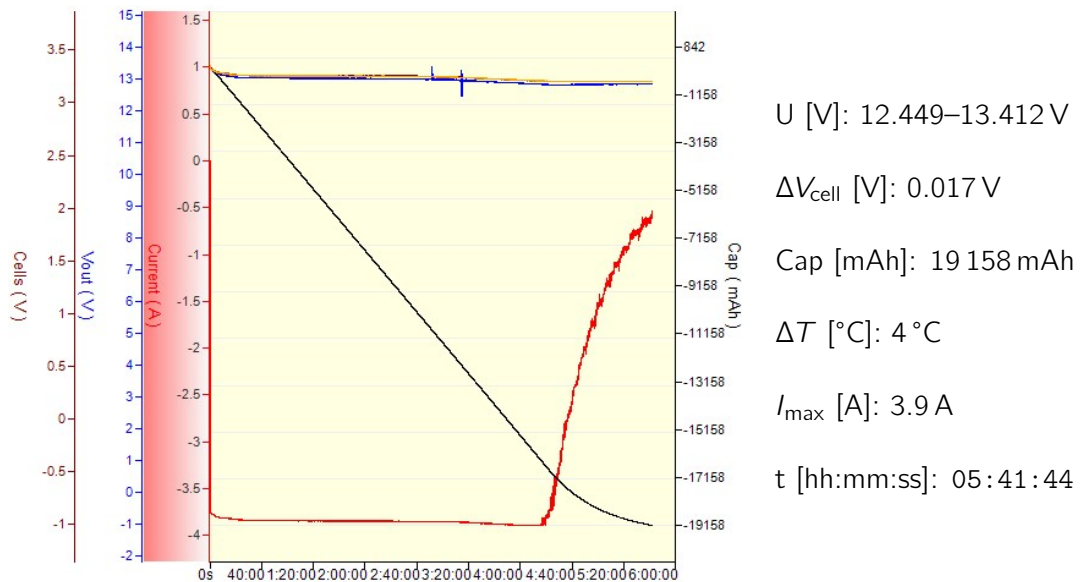
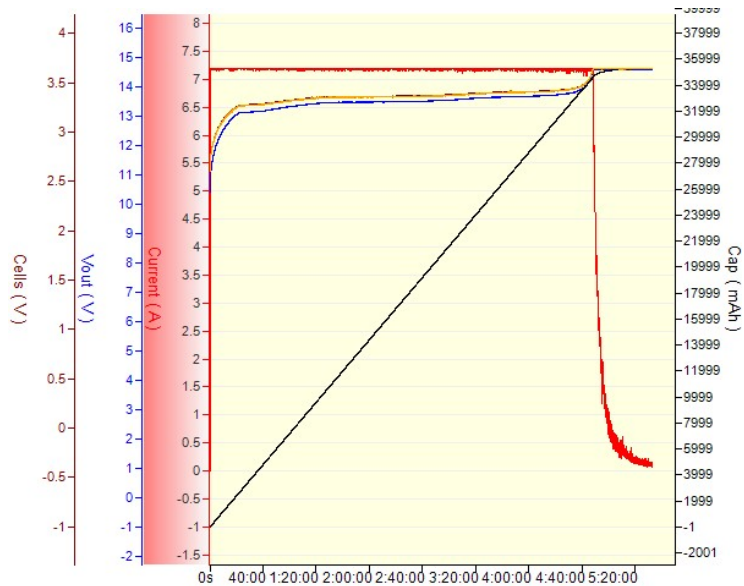


Figura H.12: BAT5_#1_20-80_DISCHARGE_0.75C_3

H.2 0–100 % SoC



U [V]: 10.415–14.629 V

ΔV_{cell} [V]: 0.021 V

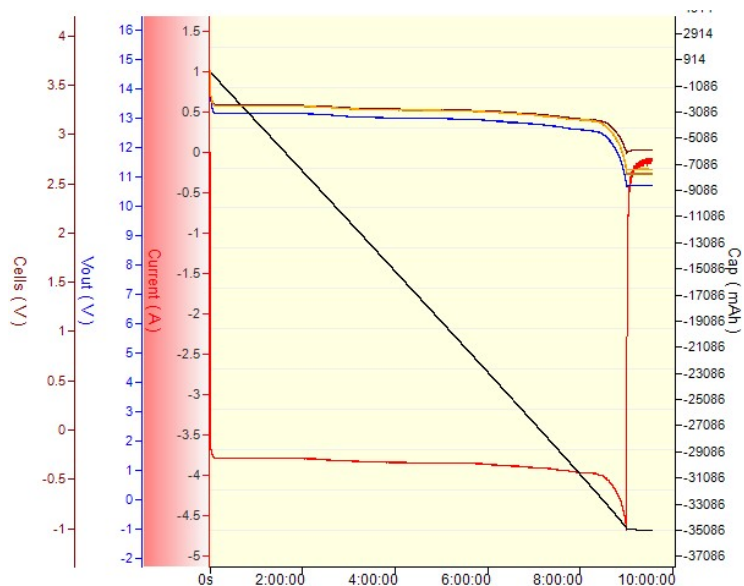
Cap [mAh]: 35 272 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 7.2 A

t [hh:mm:ss]: 05:32:50

Figura H.13: BAT5_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1



U [V]: 10.654–14.617 V

ΔV_{cell} [V]: 0.245 V

Cap [mAh]: 35 086 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 4.69 A

t [hh:mm:ss]: 09:33:14

Figura H.14: BAT5_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1

Apêndice I

Ensaios Realizados - Bateria 6

Este apêndice apresenta os registos gráficos dos ensaios realizados com a Bateria 6 - Turnigy Bolt 1800. Cada gráfico corresponde a uma carga ou descarga, obtido com os equipamentos e métodos descritos no Capítulo 5. Os ensaios foram realizados em regime CC-CV, no caso das cargas, e em regime CP-CV no caso das descargas, com diferentes valores de C-rate. A tensão, a corrente e a capacidade acumulada foram continuamente monitorizadas ao longo do tempo.

Os gráficos encontram-se organizados com a imagem do ensaio à esquerda e um comentário técnico à direita, que inclui:

- U [V]: intervalo de tensão;
- ΔV_{cell} [V]: desvio máximo entre a tensão das células da bateria;
- Cap [mAh]: capacidade medida;
- ΔT [°C]: variação de temperatura;
- I_{max} [A]: corrente máxima aplicada;
- t [hh:mm:ss]: duração do ensaio.

Cada gráfico está identificado, seguindo a seguinte nomenclatura:

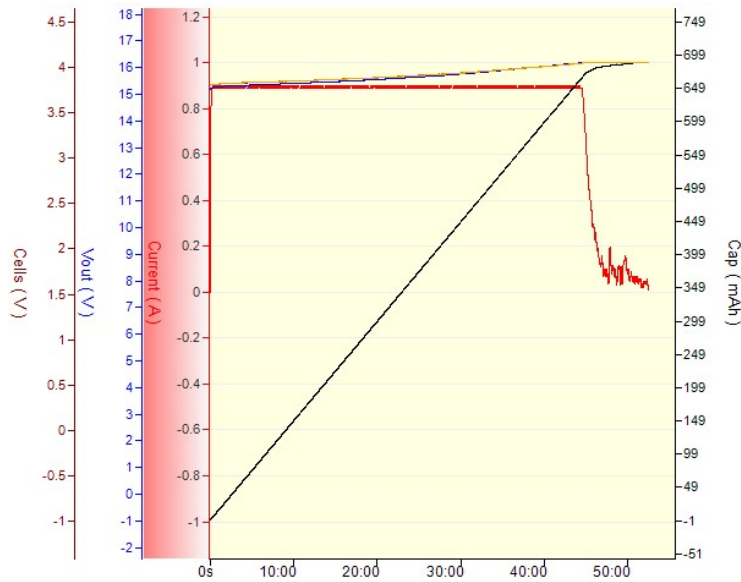
BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3

onde:

- BAT6 é o identificador da Bateria 6;
- #1 indica o âmbito do caso de estudo realizado (se Caso de Estudo #1 ou #2);
- 20-80 refere-se à faixa de SoC do ciclo realizado, se parcial (20-80) ou se completo (0-100);
- DISCHARGE indica um ensaio de descarga, CHARGE se carga;
- 1.0C identifica o C-rate utilizado no ensaio;
- 3 refere-se ao número do ensaio (1, 2 ou 3 dado que foram realizados 3 ensaios para cada situação).

Este conjunto de dados complementa os resultados apresentados no Capítulo 6, permitindo uma análise visual da resposta desta bateria sob as diferentes condições testadas.

I.1 20–80 % SoC



U [V]: 15.195–16.198 V

ΔV_{cell} [V]: 0.007 V

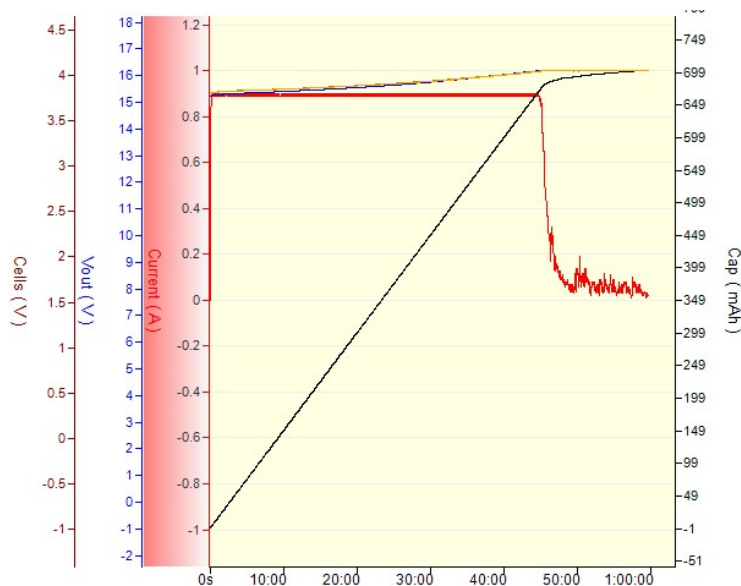
Cap [mAh]: 689 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 0.9 A

t [hh:mm:ss]: 00:52:25

Figura I.1: BAT6_#1_20-80_CHARGE_0.5C_1



U [V]: 15.205–16.199 V

ΔV_{cell} [V]: 0.009 V

Cap [mAh]: 703 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{max} [A]: 0.9 A

t [hh:mm:ss]: 00:59:46

Figura I.2: BAT6_#1_20-80_CHARGE_0.5C_2

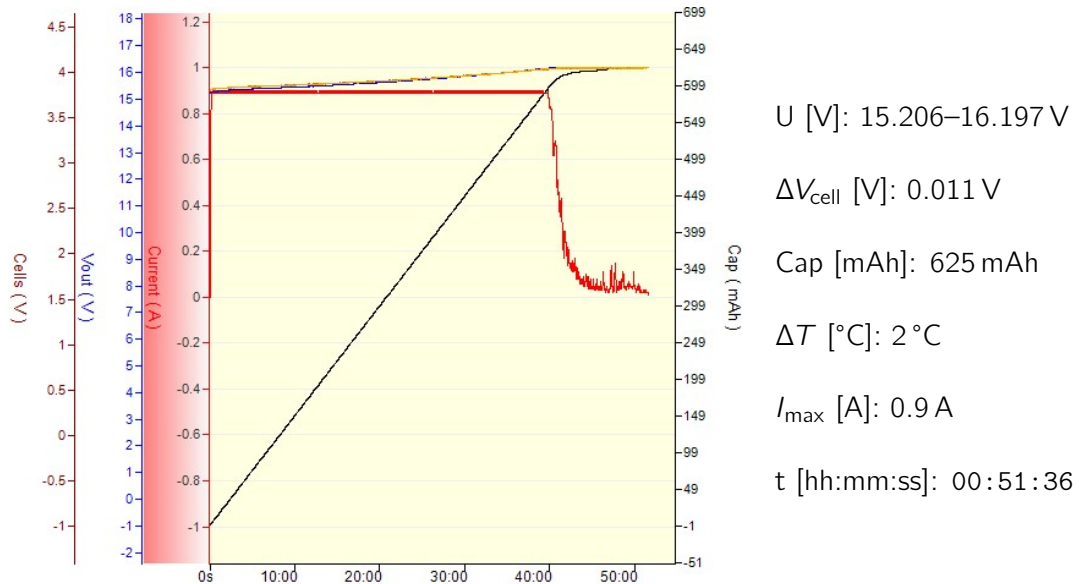


Figura I.3: BAT6_#1_20-80_CHARGE_0.5C_3

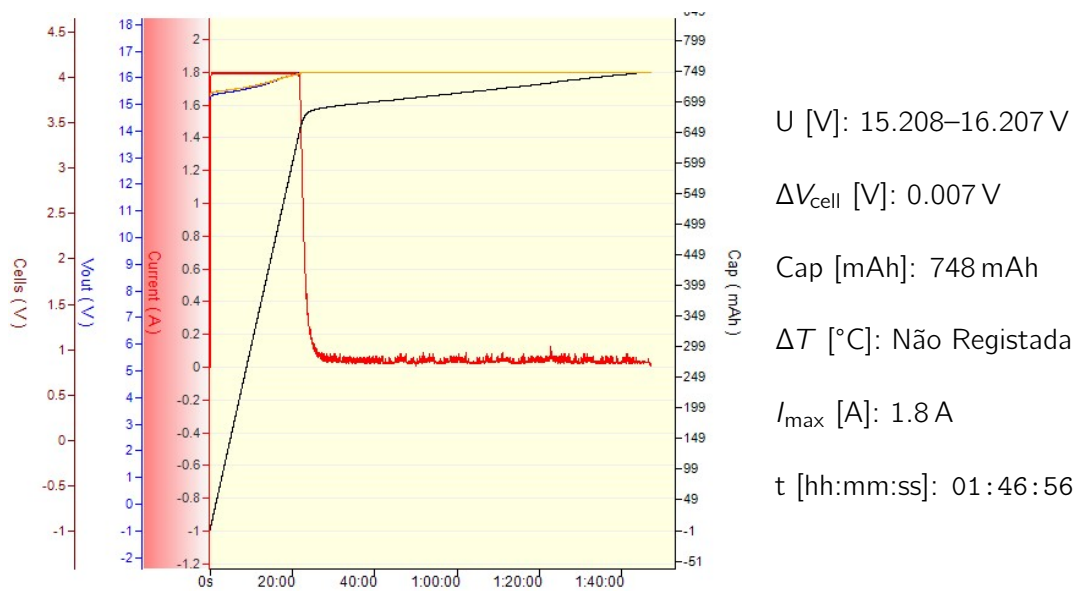
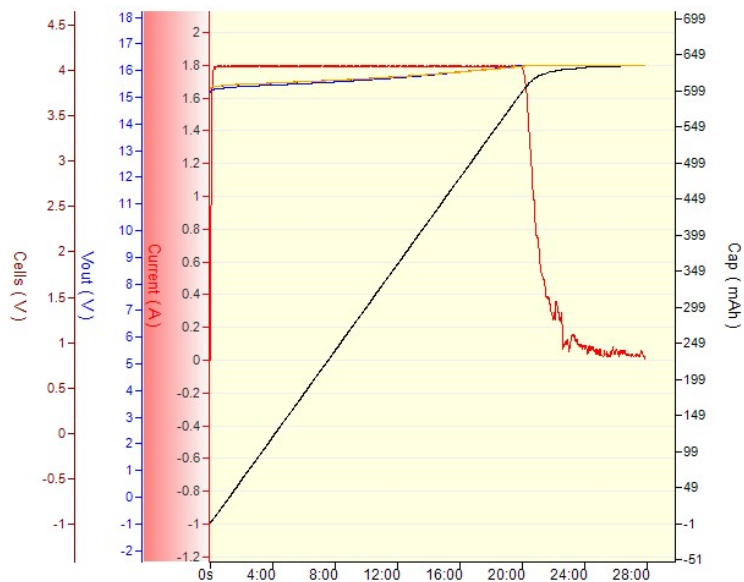


Figura I.4: BAT6_#1_20-80_CHARGE_1.0C_1



U [V]: 15.204–16.202 V

ΔV_{cell} [V]: 0.006 V

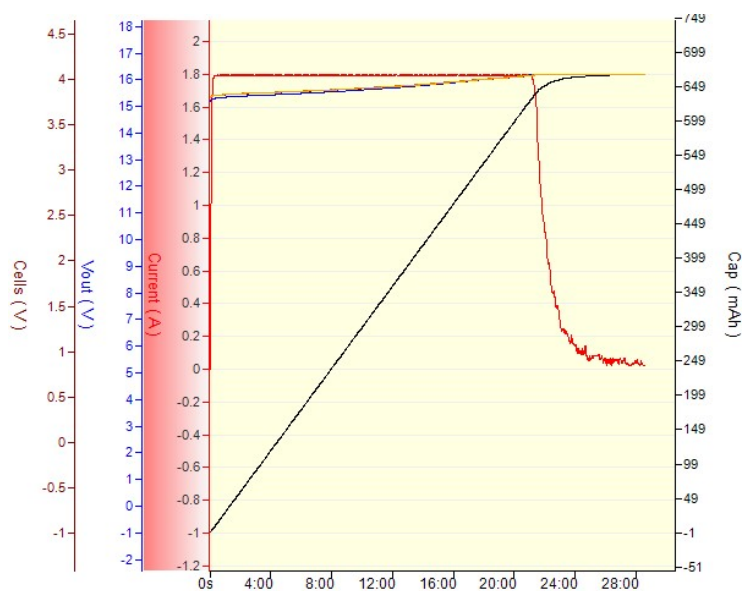
Cap [mAh]: 635 mAh

ΔT [°C]: 1 °C

I_{max} [A]: 1.8 A

t [hh:mm:ss]: 00:27:51

Figura I.5: BAT6_#1_20-80_CHARGE_1.0C_2



U [V]: 15.204–16.208 V

ΔV_{cell} [V]: 0.009 V

Cap [mAh]: 668 mAh

ΔT [°C]: 2 °C

I_{max} [A]: 1.8 A

t [hh:mm:ss]: 00:28:35

Figura I.6: BAT6_#1_20-80_CHARGE_1.0C_3

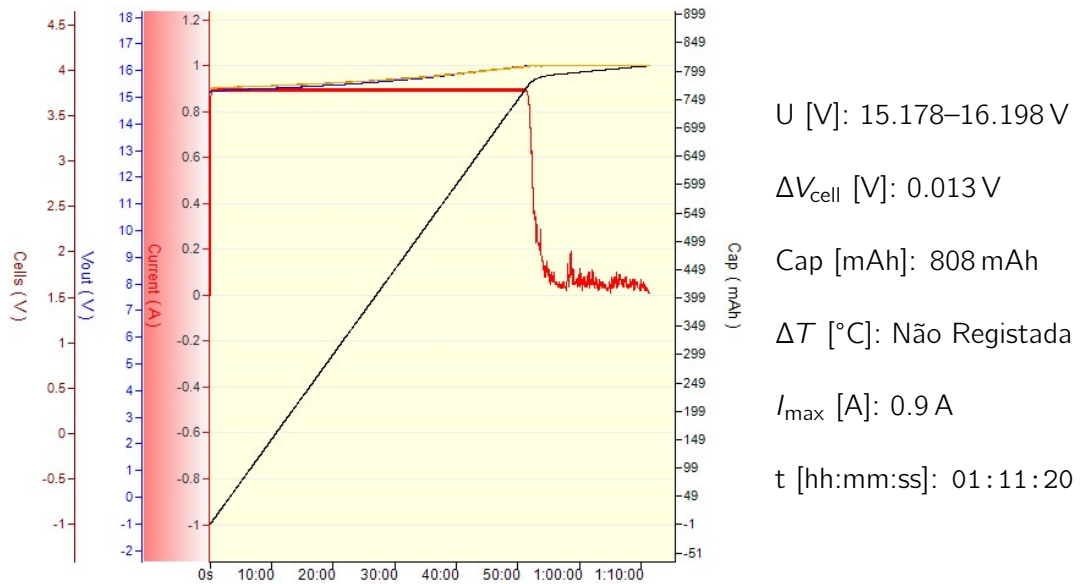


Figura I.7: BAT6_#1_20-80_CHARGE_2.0C_1

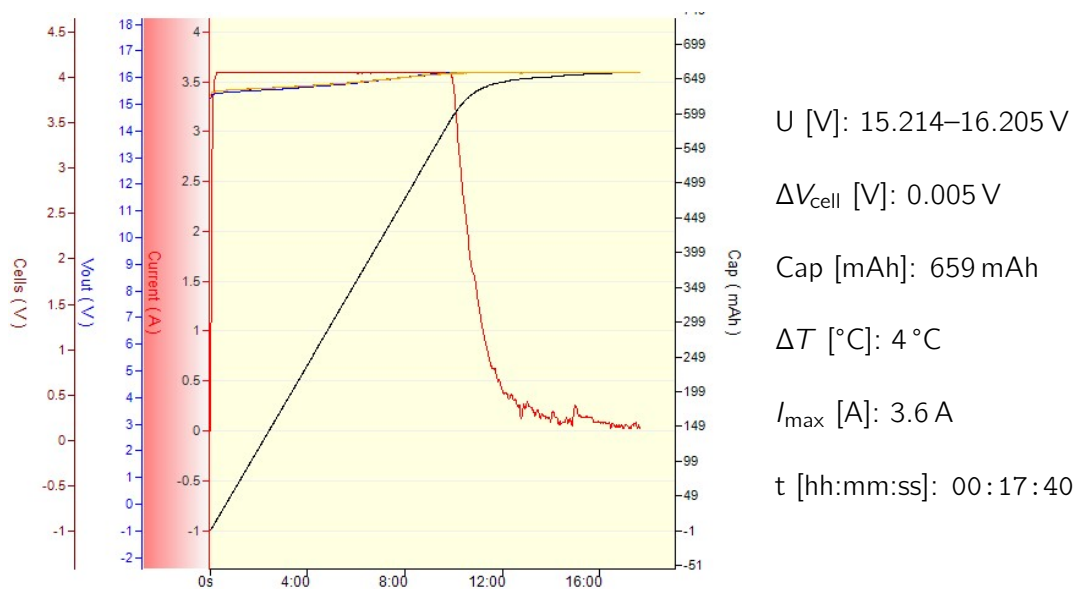


Figura I.8: BAT6_#1_20-80_CHARGE_2.0C_2

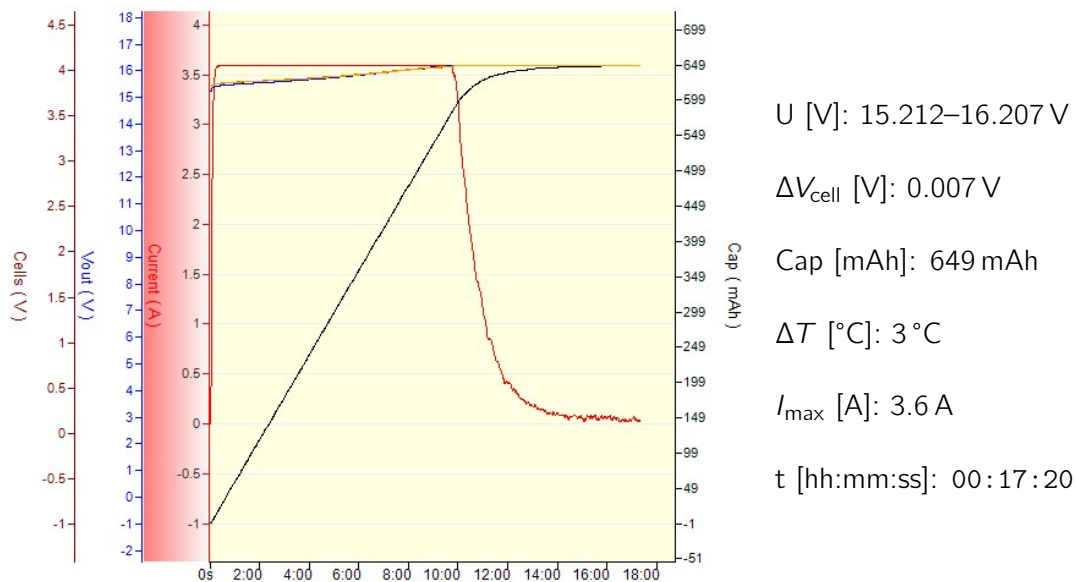


Figura I.9: BAT6_#1_20-80_CHARGE_2.0C_3

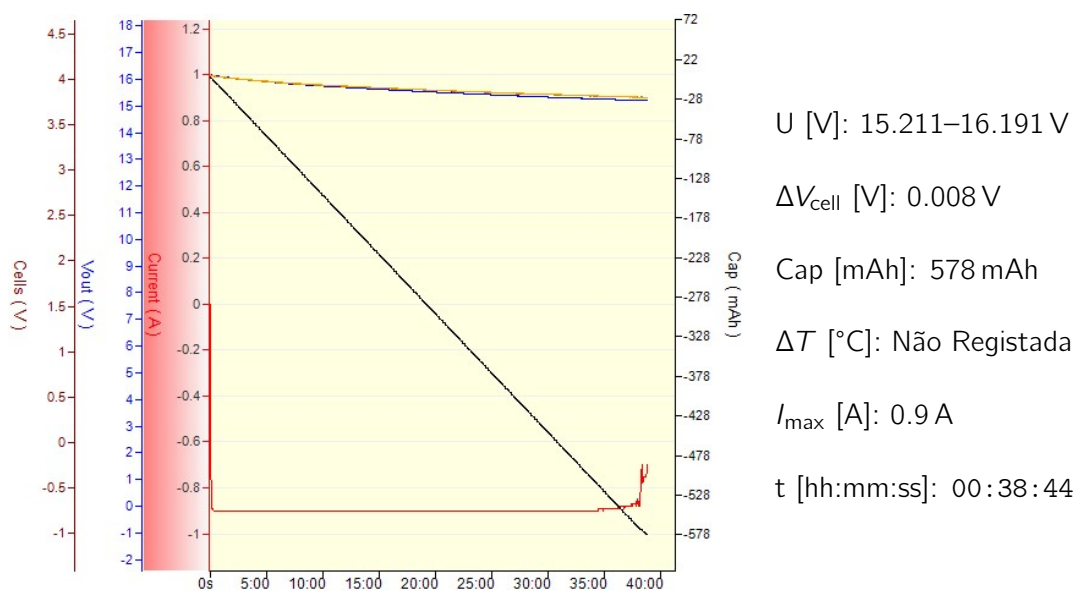


Figura I.10: BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_1

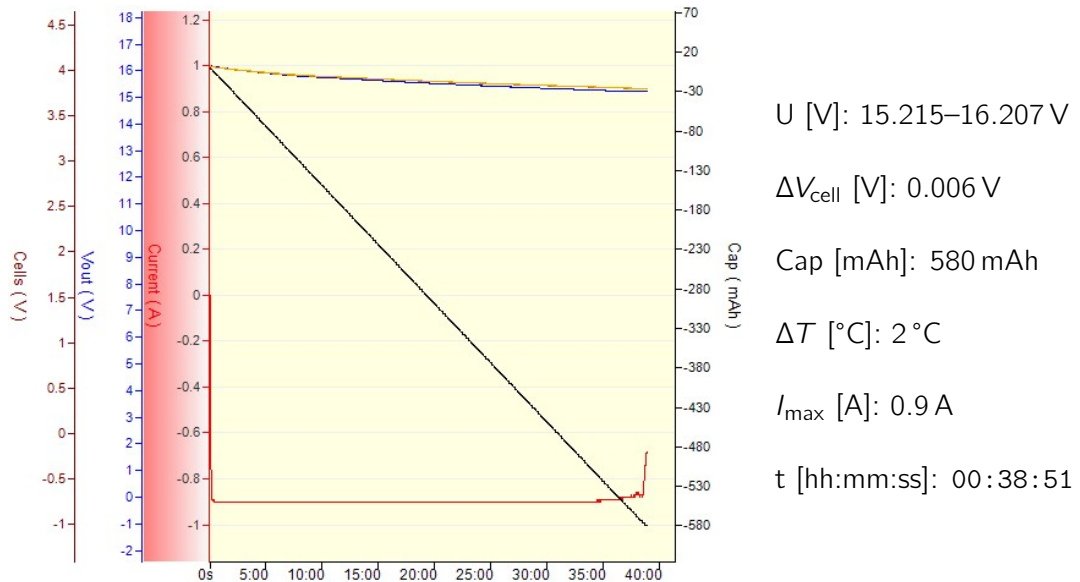


Figura I.11: BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_2

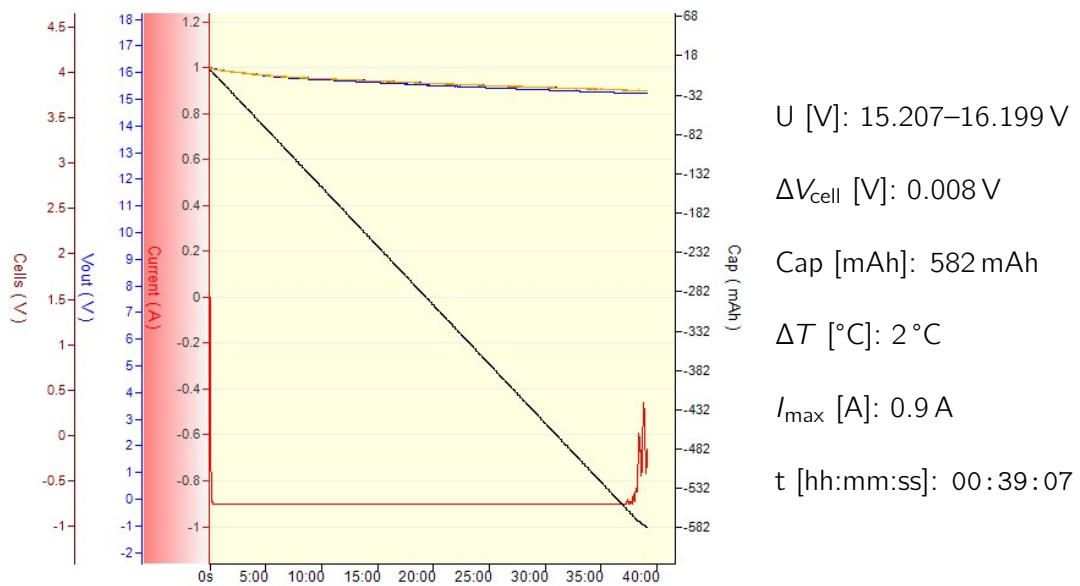
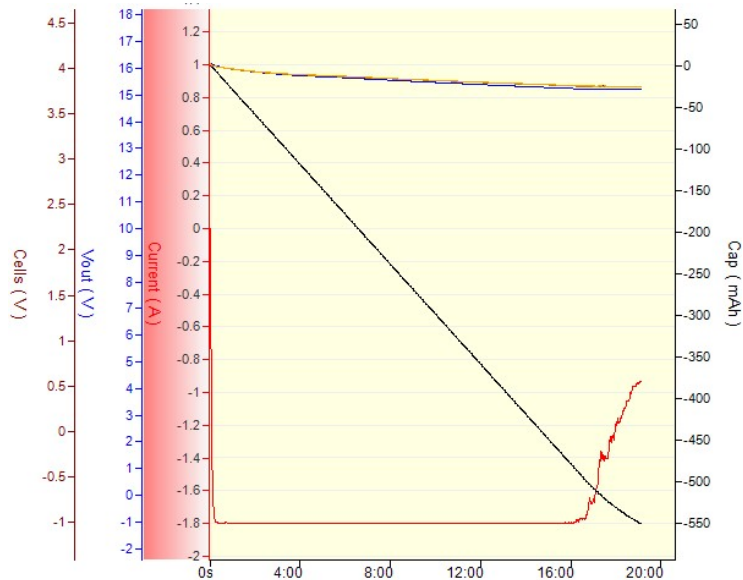


Figura I.12: BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_0.5C_3



U [V]: 15.213–16.192 V

ΔV_{cell} [V]: 0.006 V

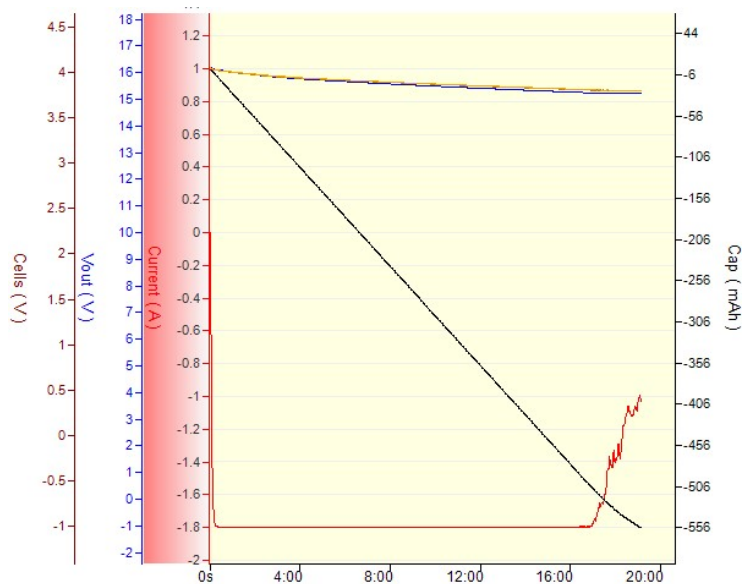
Cap [mAh]: 550 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 1.8 A

t [hh:mm:ss]: 00:19:07

Figura I.13: BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_1



U [V]: 15.216–16.200 V

ΔV_{cell} [V]: 0.007 V

Cap [mAh]: 556 mAh

ΔT [°C]: 2 °C

I_{max} [A]: 1.8 A

t [hh:mm:ss]: 00:19:09

Figura I.14: BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_2

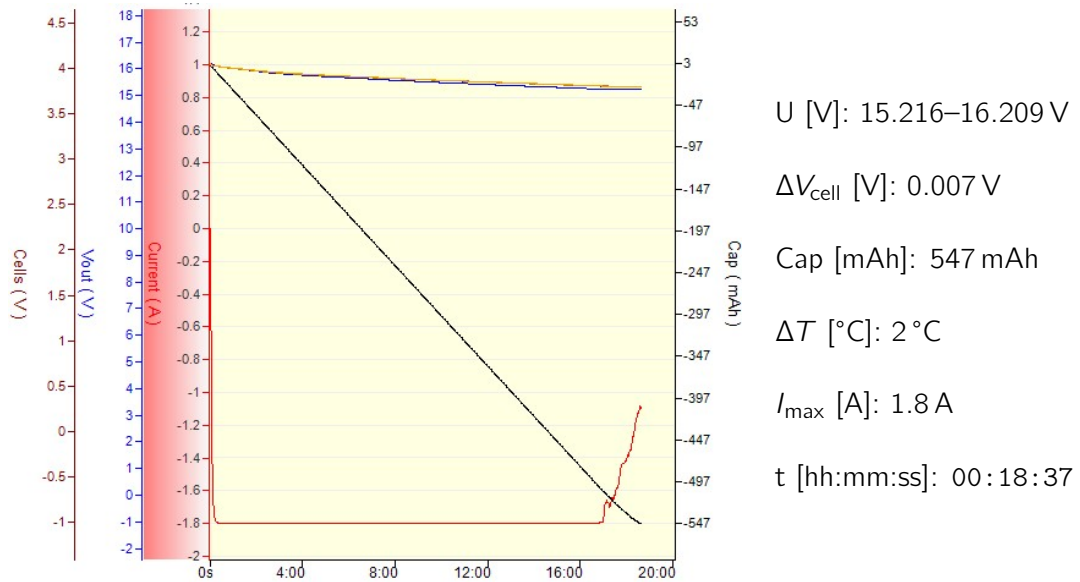


Figura I.15: BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_1.0C_3

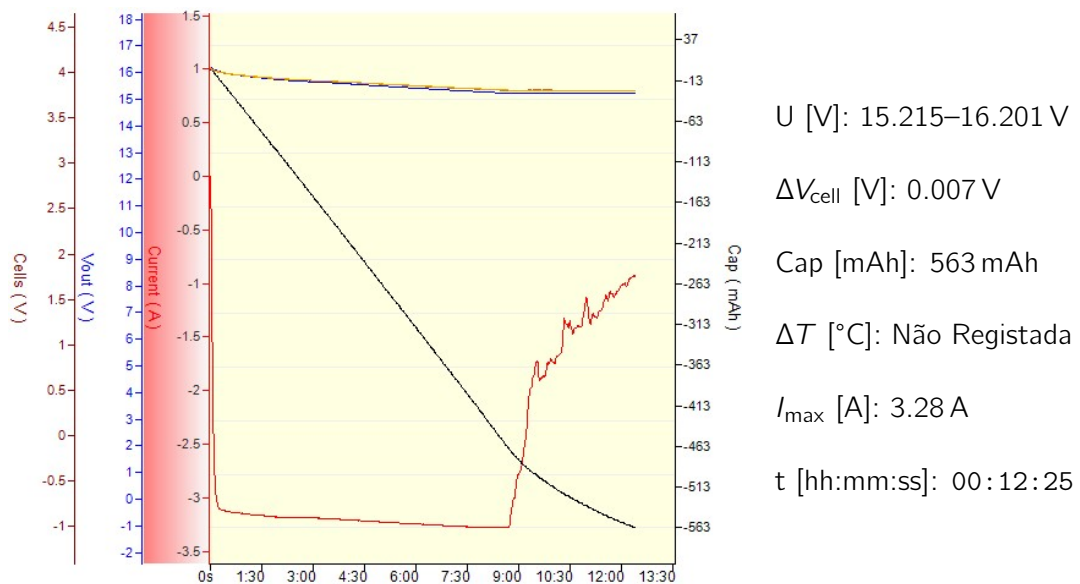
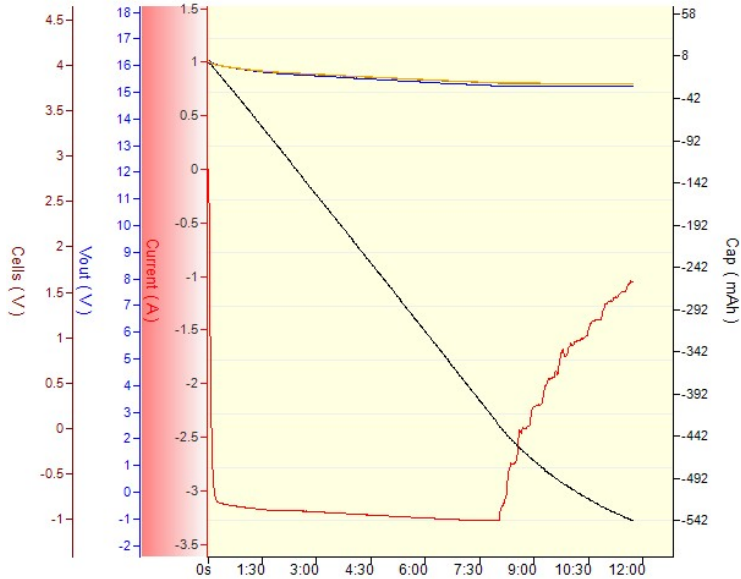


Figura I.16: BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_1



U [V]: 15.217–16.203 V

ΔV_{cell} [V]: 0.009 V

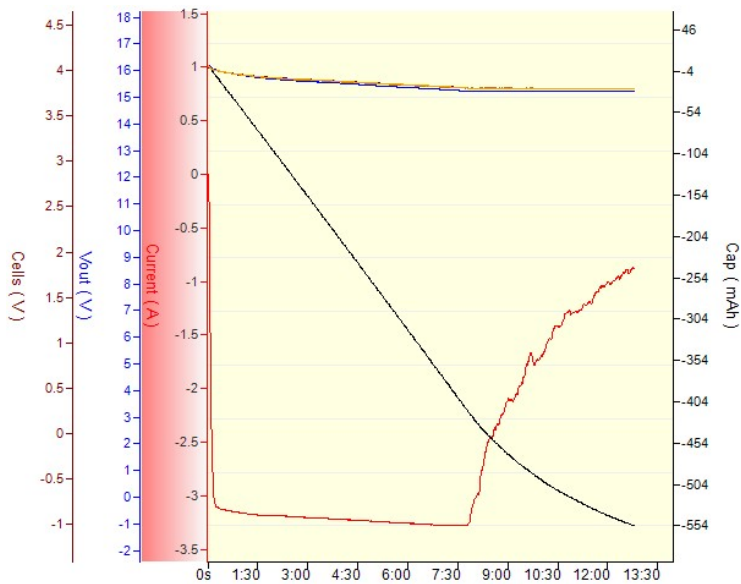
Cap [mAh]: 542 mAh

ΔT [°C]: 2 °C

I_{max} [A]: 3.28 A

t [hh:mm:ss]: 00:11:43

Figura I.17: BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_2



U [V]: 15.209–16.202 V

ΔV_{cell} [V]: 0.010 V

Cap [mAh]: 554 mAh

ΔT [°C]: 2 °C

I_{max} [A]: 3.28 A

t [hh:mm:ss]: 00:12:47

Figura I.18: BAT6_#1_20-80_DISCHARGE_2.0C_3

I.2 0–100 % SoC

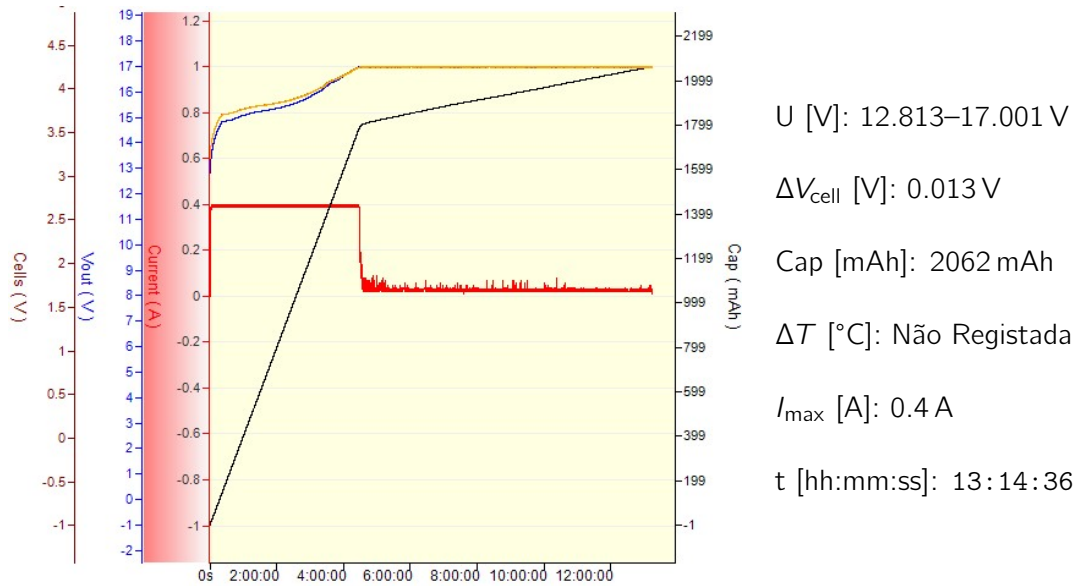


Figura I.19: BAT6_#2_0-100_CHARGE_0.2C_1

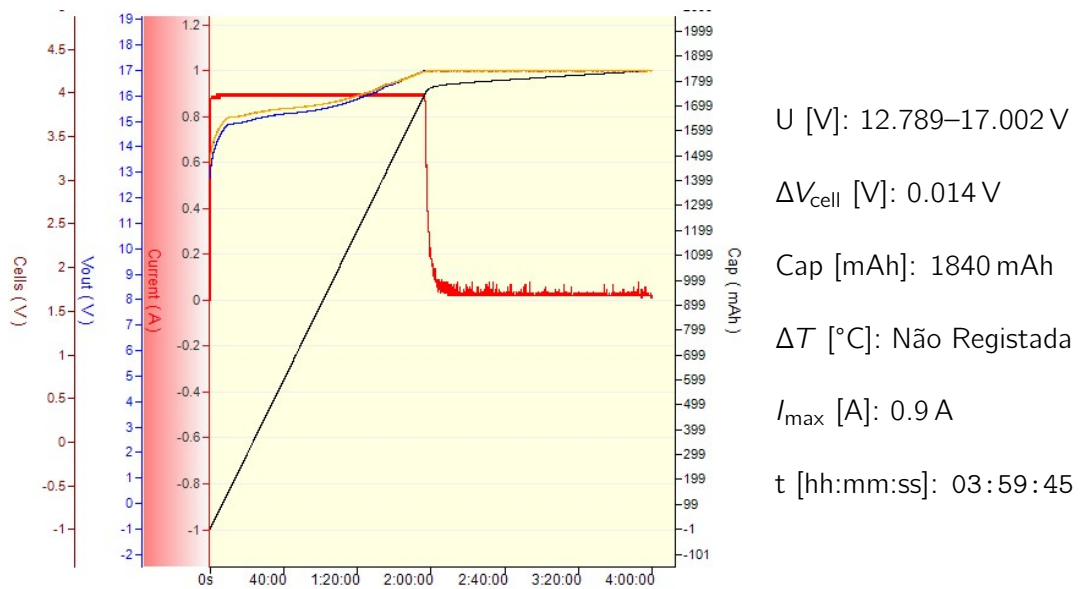
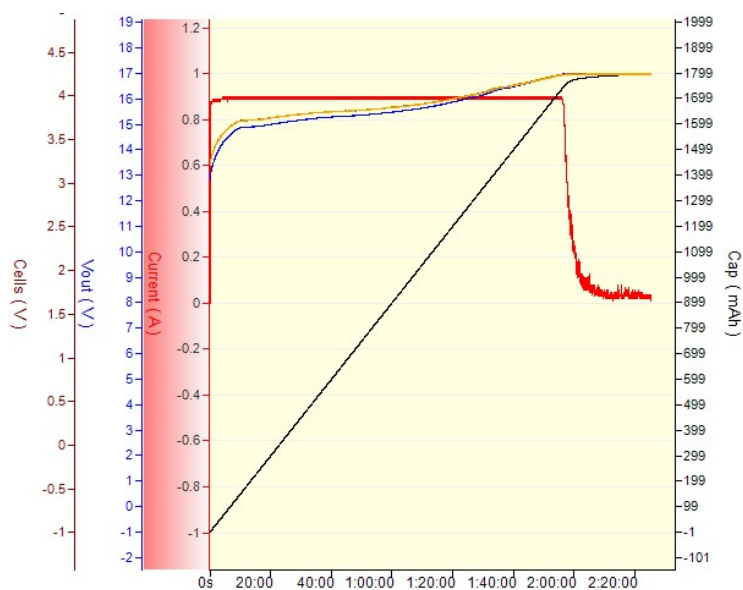


Figura I.20: BAT6_#1_0-100_CHARGE_0.5C_1



U [V]: 12.809–17.002 V

ΔV_{cell} [V]: 0.017 V

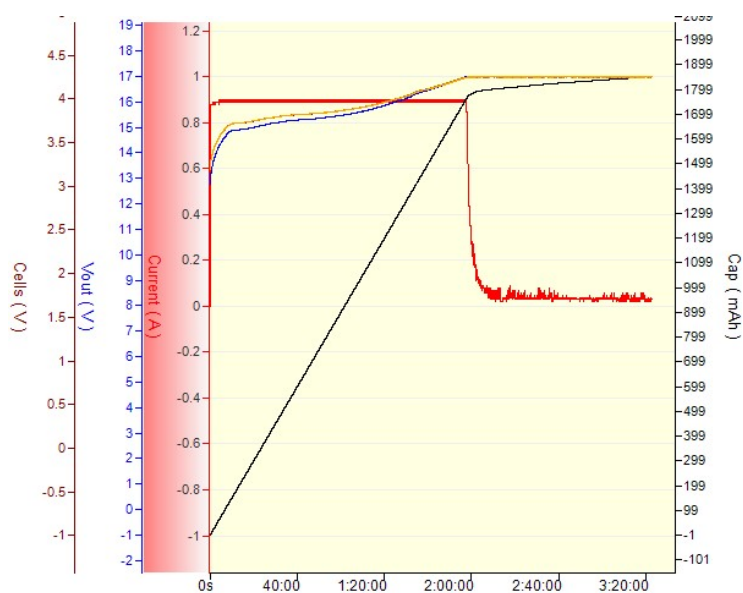
Cap [mAh]: 1796 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{max} [A]: 0.9 A

t [hh:mm:ss]: 02:25:22

Figura I.21: BAT6_#1_0-100_CHARGE_0.5C_2



U [V]: 12.792–17.001 V

ΔV_{cell} [V]: 0.014 V

Cap [mAh]: 1850 mAh

ΔT [°C]: 3 °C

I_{max} [A]: 0.9 A

t [hh:mm:ss]: 03:22:27

Figura I.22: BAT6_#1_0-100_CHARGE_0.5C_3

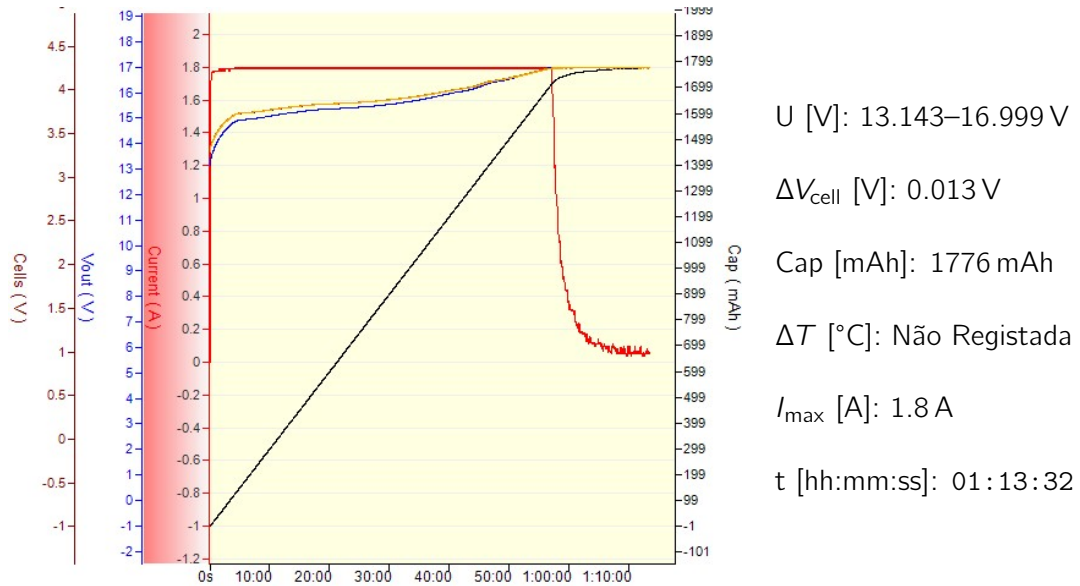


Figura I.23: BAT6_#1_0-100_CHARGE_1.0C_1

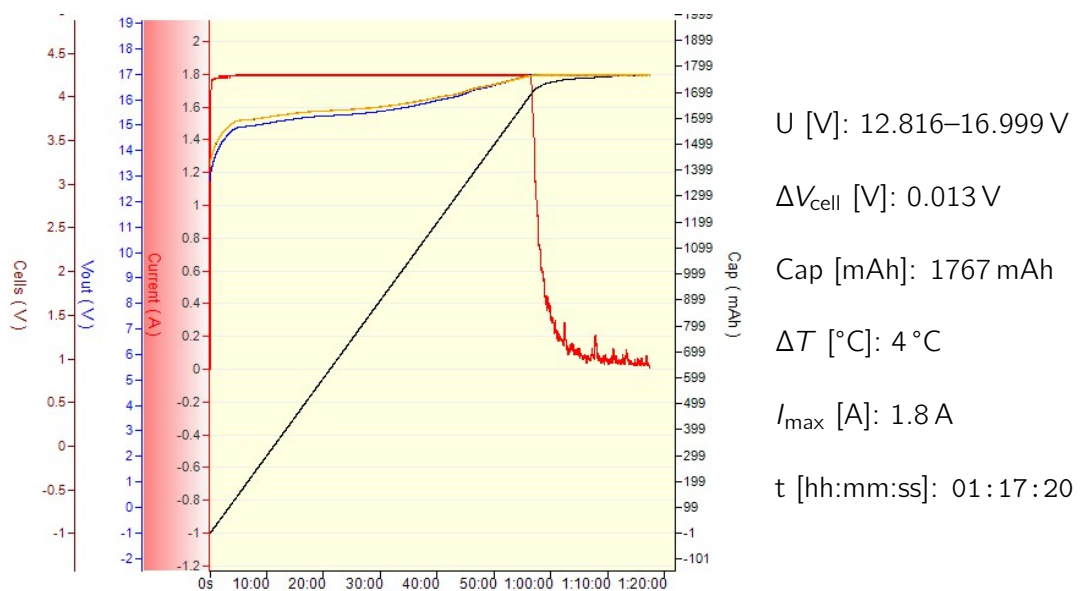
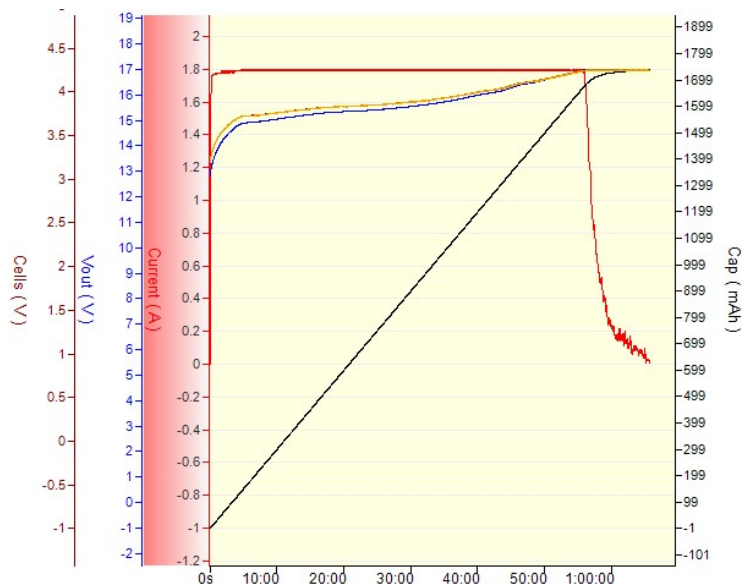


Figura I.24: BAT6_#1_0-100_CHARGE_1.0C_2



U [V]: 12.805–17.003 V

ΔV_{cell} [V]: 0.020 V

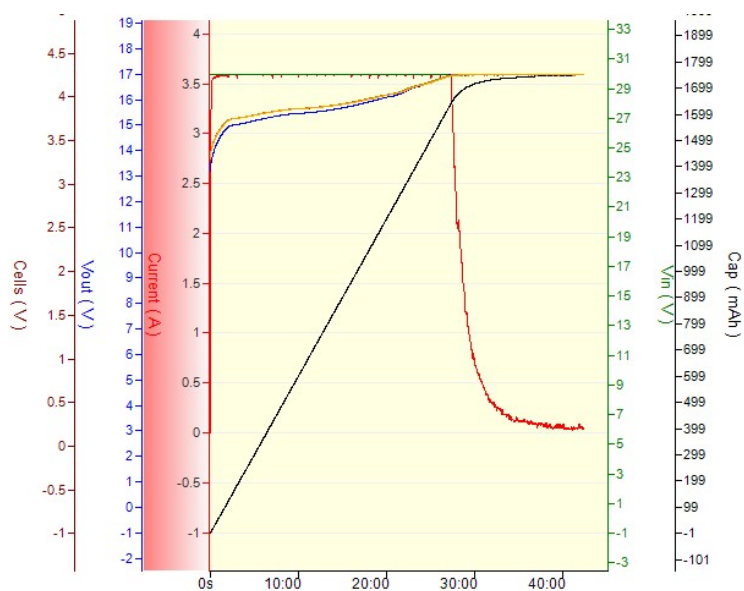
Cap [mAh]: 1738 mAh

ΔT [°C]: 5 °C

I_{max} [A]: 1.8 A

t [hh:mm:ss]: 01:05:40

Figura I.25: BAT6_#1_0-100_CHARGE_1.0C_3



U [V]: 13.175–16.998 V

ΔV_{cell} [V]: 0.016 V

Cap [mAh]: 1750 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 3.6 A

t [hh:mm:ss]: 00:42:28

Figura I.26: BAT6_#1_0-100_CHARGE_2.0C_1

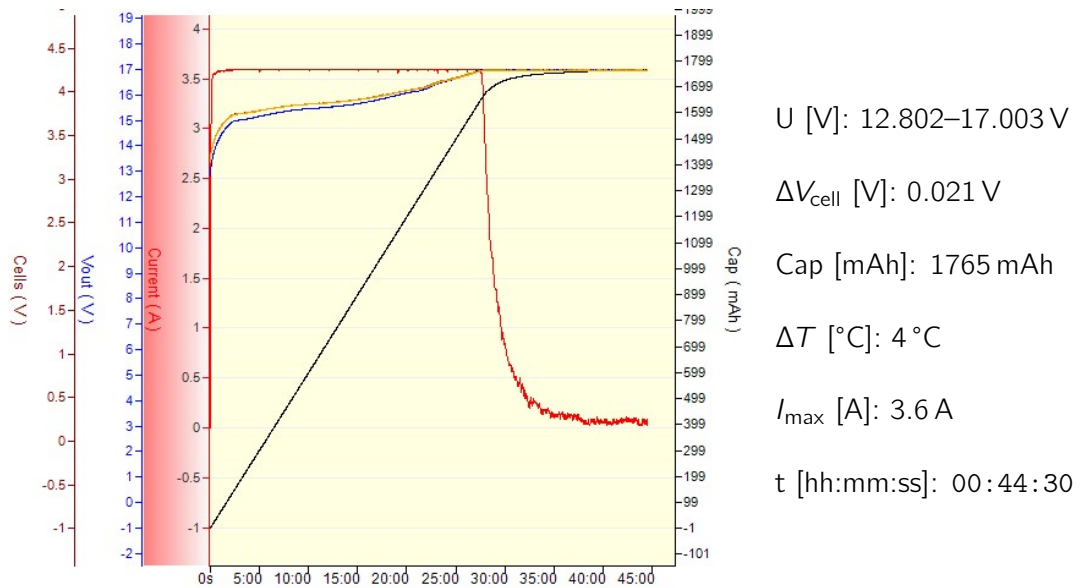


Figura I.27: BAT6_#1_0-100_CHARGE_2.0C_2

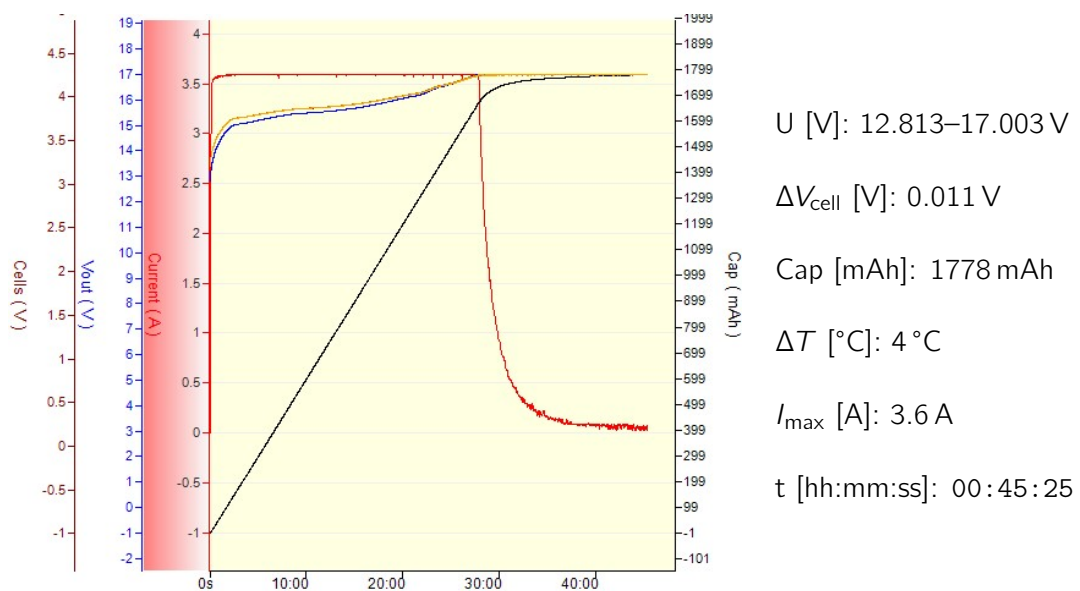
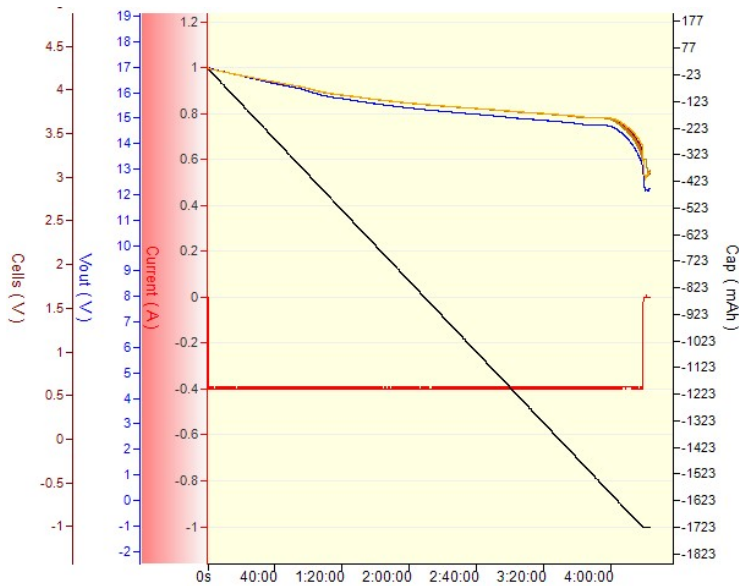


Figura I.28: BAT6_#1_0-100_CHARGE_2.0C_3



U [V]: 12.128–16.997 V

ΔV_{cell} [V]: 0.240 V

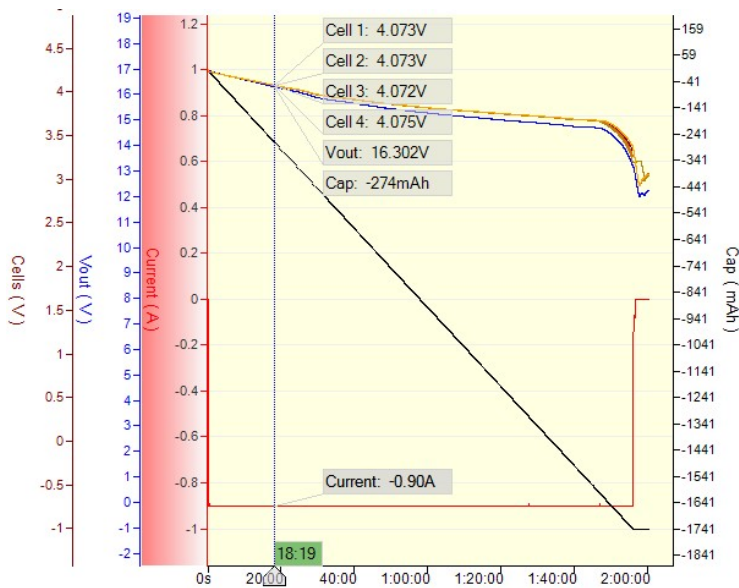
Cap [mAh]: 1723 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 0.4 A

t [hh:mm:ss]: 04:22:50

Figura I.29: BAT6_#2_0-100_DISCHARGE_0.2C_1



U [V]: 12.011–16.990 V

ΔV_{cell} [V]: 0.283 V

Cap [mAh]: 1741 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 0.9 A

t [hh:mm:ss]: 02:00:23

Figura I.30: BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_0.5C_1

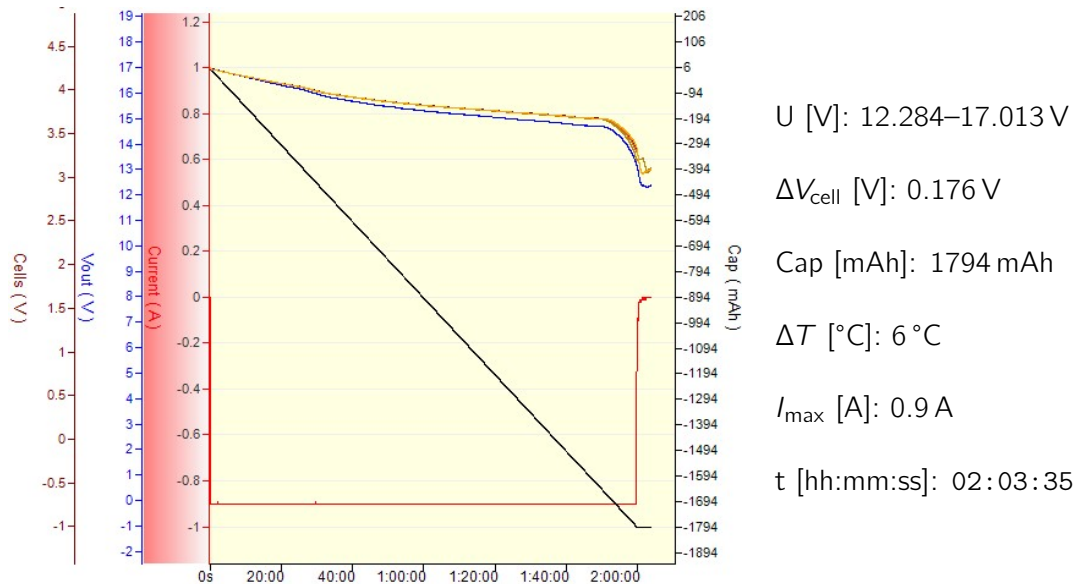


Figura I.31: BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_0.5C_2

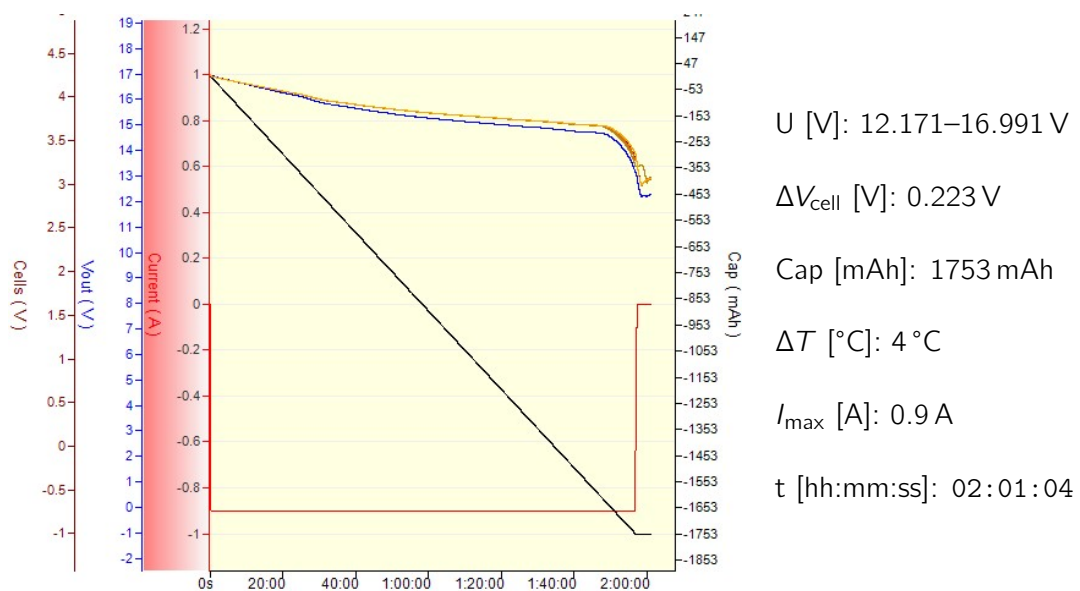
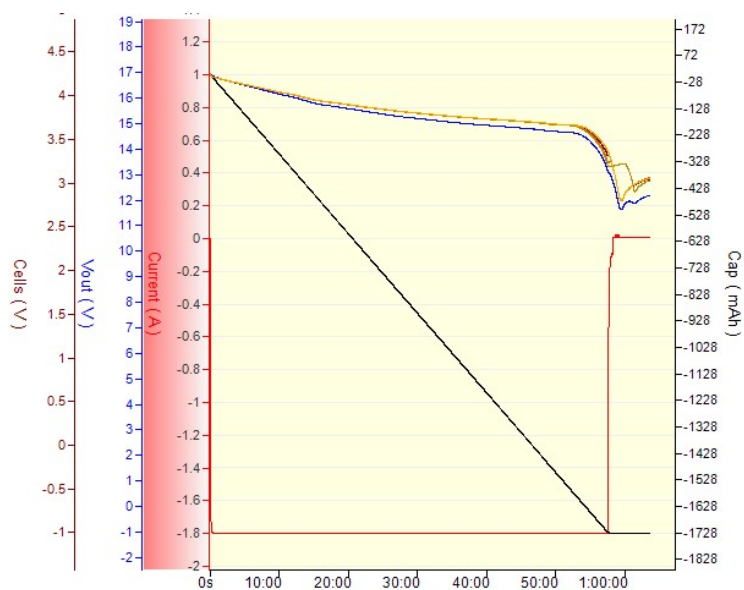


Figura I.32: BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_0.5C_3



U [V]: 11.627–16.973 V

ΔV_{cell} [V]: 0.420 V

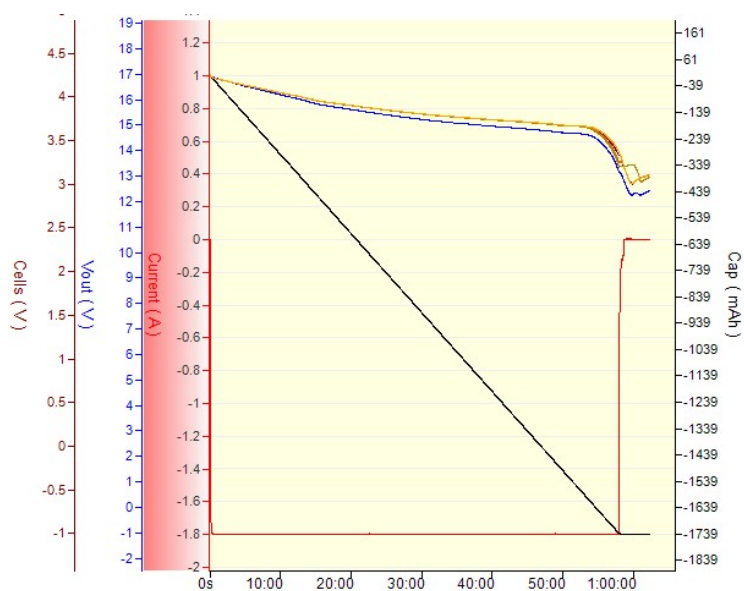
Cap [mAh]: 1728 mAh

ΔT [°C]: Não Registrada

I_{max} [A]: 1.8 A

t [hh:mm:ss]: 01:03:32

Figura I.33: BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_1.0C_1



U [V]: 12.252–16.998 V

ΔV_{cell} [V]: 0.221 V

Cap [mAh]: 1739 mAh

ΔT [°C]: 7 °C

I_{max} [A]: 1.8 A

t [hh:mm:ss]: 01:02:13

Figura I.34: BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_1.0C_2

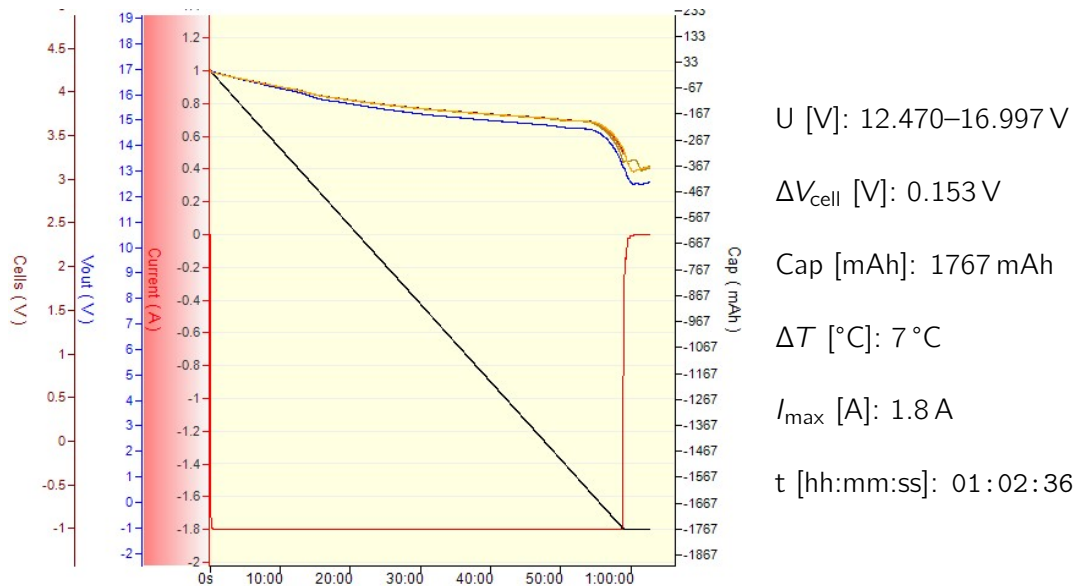


Figura I.35: BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_1.0C_3

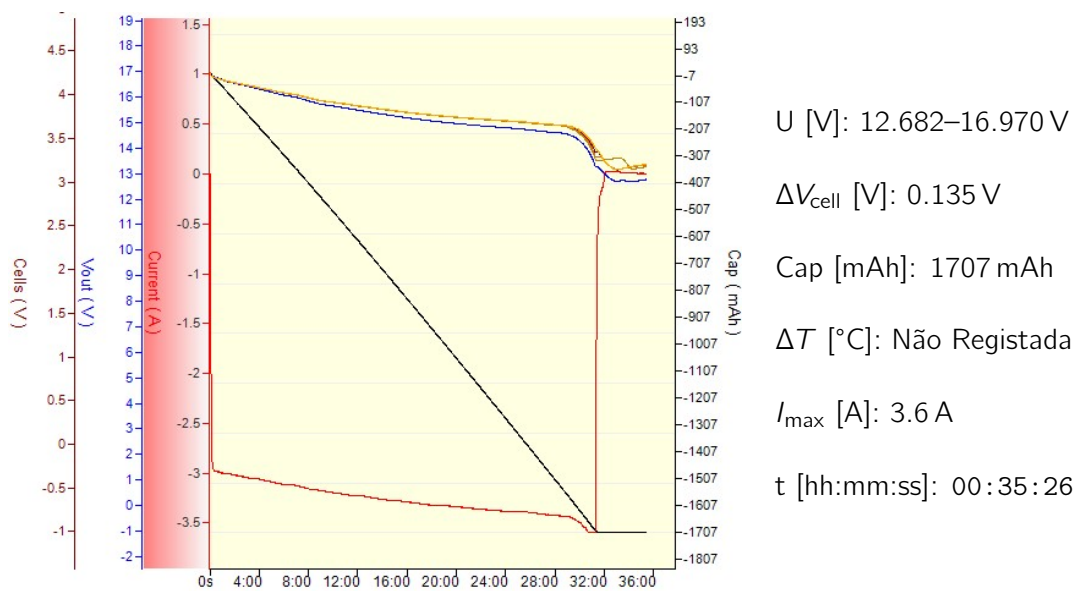
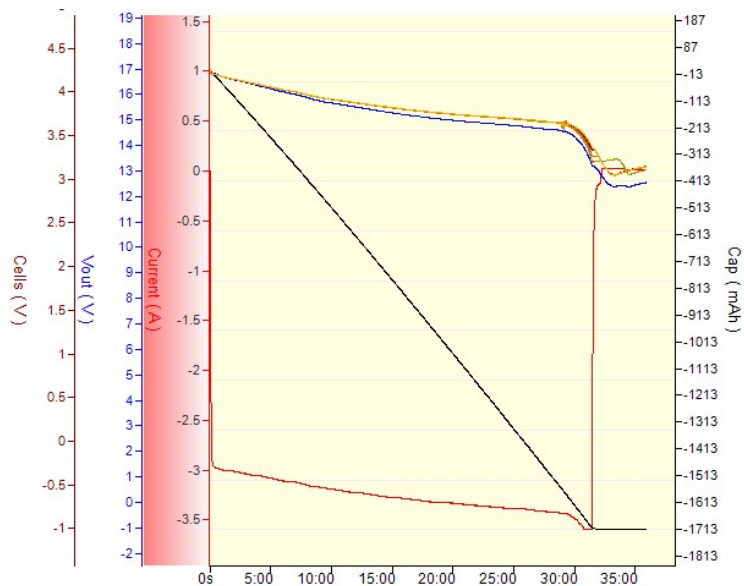


Figura I.36: BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_2.0C_1



U [V]: 12.370–16.984 V

ΔV_{cell} [V]: 0.184 V

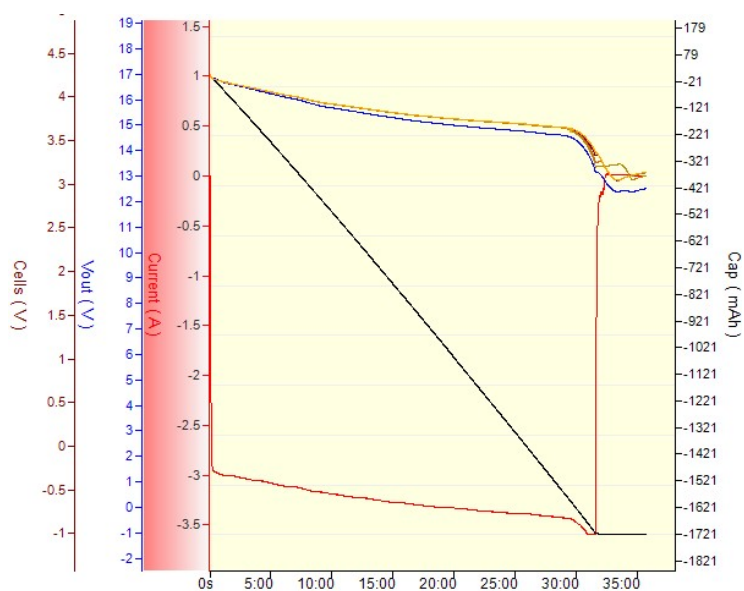
Cap [mAh]: 1713 mAh

ΔT [°C]: 11 °C

I_{max} [A]: 3.6 A

t [hh:mm:ss]: 00:35:55

Figura I.37: BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_2.0C_2



U [V]: 12.368–16.992 V

ΔV_{cell} [V]: 0.186 V

Cap [mAh]: 1721 mAh

ΔT [°C]: 11 °C

I_{max} [A]: 3.6 A

t [hh:mm:ss]: 00:35:47

Figura I.38: BAT6_#1_0-100_DISCHARGE_2.0C_3