



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA

Desenvolvimento de um Sistema de Gestão de Baterias para Veículos Elétricos

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Eletrotécnica

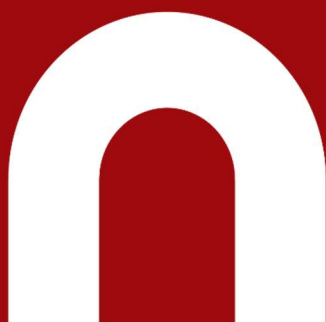
Especialização em Automação e Comunicações em
Sistemas Industriais

Autor

João Luís da Silva Neto

Orientador

Prof. Doutor Paulo José Gameiro Pereirinha



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Maio de 2023

RESUMO

As baterias dos Veículos Elétricos (VEs) ou Veículos Elétricos Plug-in (PHEV) podem ser reutilizadas noutros veículos, em sistemas estacionários de armazenamento de energia elétrica ou em projetos académicos e de investigação. Para isso, é necessário controlar e aceder aos dados da bateria através de um Sistema de Gestão de Baterias (*Battery Management System*, BMS). Contudo, normalmente esta informação não está disponível em código aberto, sendo assim necessário instalar e/ou desenvolver um novo BMS. Este projeto aborda os BMSs e suas funcionalidades que visam melhorar o desempenho de veículos elétricos, otimizando a capacidade da bateria durante a carga e descarga, garantindo a segurança e a vida útil de uma bateria de tração, promovendo a mobilidade sustentável. Os processos de desenvolvimento, construção e teste de um BMS são apresentados neste trabalho. O BMS desenvolvido é configurável por software, podendo ser utilizado com outras baterias da mesma tecnologia, necessitando apenas de realizar pequenos ajustes na programação. O modelo de bateria em estudo e os motivos para desenvolver um novo BMS também estão relatados, bem como a escolha do MAX17852, o circuito integrado de aquisição de dados, usado para monitorizar e balancear as células da bateria. Este trabalho descreve as etapas realizadas durante o desenvolvimento de todos os componentes do BMS, incluindo o processo do projeto e montagem das Placas de Circuito Impresso (PCBs), bem como os testes funcionais. Abordam-se também os protocolos de comunicação utilizados para interface entre elementos do BMS.

Do trabalho realizado, resultou a aceitação e apresentação da comunicação: João L. Neto, Marco Silva, Paulo G. Pereirinha, “Development of a Battery Management System for Electric Vehicle’s Batteries Reuse”, 4th EAI International Conference on Sustainable Energy for Smart Cities, EAI SESC 2022, November 16-18, 2022. Original Location: Braga, Portugal (online).

Palavras-chave: Sistemas de Gestão de Baterias, Veículos Elétricos, PHEV, Bateria de Tração, Segunda vida de baterias.

ABSTRACT

Electric Vehicles (EV) or Plug-in Electric Vehicles (PHEV) batteries can have a second life in other vehicles, in stationary electrical energy storage systems, or in academic or research projects. For this purpose, it is necessary to control and access the battery data through a Battery Management System (BMS), which is often not available in open source, therefore, it is necessary to install and/or develop a new BMS. This project discusses the BMS types and their features that aim to improve the performance of electric vehicles, optimizing battery capacity during charging and discharging, ensuring the safety and lifetime of a traction battery, promoting sustainable mobility. The process of developing, building, and testing a BMS is presented in this work. It should also be noted that the developed BMS is software configurable, so it can be used with other batteries of the same technology. The battery model under study and the reason to produce a new BMS are briefly reported, as well as the choice of MAX17852, as the data-acquisition Integrated Circuit (IC) used to monitor the battery cells. This work describes the steps taken during the design of all BMS components, including the Printed Circuit Boards (PCBs) design and assembly process, as well as functional tests. The used communication protocols between the BMS elements/components are also addressed.

The work carried out resulted in the acceptance and presentation of the paper: João L. Neto, Marco Silva, Paulo G. Pereirinha, “Development of a Battery Management System for Electric Vehicle's Batteries Reuse”, 4th EAI International Conference on Sustainable Energy for Smart Cities, EAI SESC 2022, November 16-18, 2022. Original Location: Braga, Portugal (online).

Keywords: Battery Management System, Electric Vehicles, PHEV, Traction Battery, Battery Second Life.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Doutor Paulo Pereirinha, pela sua disponibilidade e acompanhamento ao longo deste projeto.

Ao Professor Marco Silva, pelos conselhos, pela partilha de conhecimentos e a disponibilidade constante desde o início do projeto.

À minha namorada, pela paciência, companheirismo e motivação mesmo nos momentos mais críticos. Aos familiares, colegas e amigos pelo apoio prestado durante o decorrer deste projeto.

Ao colega e amigo Júlio Silva, por todo o apoio durante as longas horas de estudo e toda a cumplicidade no decorrer do mestrado.

Ao INESC Coimbra (DEEC, Coimbra, Portugal) pelo financiamento parcial deste trabalho no âmbito do projeto UIDB/00308/2020 da FCT – Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia.

À Prio Energy (www.prio.pt/pt/) pela parceria neste projeto, fornecendo a bateria LiFePO_4 usada. À Maxim Integrated (www.maximintegrated.com/en) por fornecer amostras do integrado Max17852, para o desenvolvimento das placas PCB.

ÍNDICE

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABELAS	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 Estado da Arte das Baterias.....	3
2.1 Conceitos.....	3
2.2 Constituição de uma célula de bateria	4
2.3 Tipos de Encapsulamento.....	5
2.3.1 Cilíndricas.....	6
2.3.2 Prismáticas	6
2.3.3 Bolsa.....	7
2.4 Baterias	8
2.4.1 Chumbo-Ácido.....	8
2.4.2 Níquel Hidreto Metálico	10
2.4.3 Iões de Lítio	12
2.4.4 Bateria Utilizada	14
3 Sistema de Gestão de Baterias (BMS).....	15
3.1 Arquiteturas de BMS.....	16

3.2	Monitorização e Segurança	18
3.3	Determinação do Estado de Carga - SoC	20
3.3.1	Medição Direta	20
3.3.2	Contagem de Coulomb	21
3.3.3	Sistemas Adaptativos	21
3.4	Determinação do Estado de Saúde - SoH	22
3.5	Balanceamento das Células	23
3.5.1	<i>Shunt</i> Resistivo	24
3.5.2	<i>Shunt</i> Resistivo com Comutação	24
3.5.3	Condensadores comutados	25
3.5.4	Condensadores Comutados por Dupla Camada.....	26
3.5.5	Transformador Partilhado.....	26
3.5.6	N Transformadores em paralelo	27
4	Desenvolvimento de um BMS - Caso de estudo.....	29
4.1	Circuito Integrado de Aquisição Dados.....	29
4.2	Arquitetura do BMS.....	31
4.3	Protocolos de Comunicação	32
4.4	Desenvolvimento do Esquemático e PCB do novo BMS	36
4.5	Balanceamento das Células	44
5	Testes e ensaios.....	49
5.1	Implementação do Balanceamento das Células através de <i>software</i>	56
6	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
	ANEXOS.....	73
	Anexo A – <i>SPI Interface com Single-Ended Alert</i>	73

Anexo B – <i>Single-End ALERT Interface</i> no modo UART	74
Anexo C – <i>Cell Sense-Wire Open-Diagnostic Operations</i>	75
Anexo D – Inicialização do programa em C++	76
Anexo E – Componentes implementados em cada PCB.....	77
Anexo F – Lista de Materiais adquiridos – Parte 1	78
Anexo G – Lista de Materiais adquiridos – Parte 2	79
Anexo H – Lista de Materiais adquiridos – Parte 3	80
Anexo I – Esquemático da PCB – Parte 1	81
Anexo J – Esquemático da PCB – Parte 2.....	82
Anexo K – Bottom Layer PCB.....	83
Anexo L – Top Layer PCB	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema ilustrativo dos constituintes de uma célula eletroquímica (Denios, 2021)...	5
Figura 2.2 – <i>a)</i> Estrutura de uma célula cilíndrica; <i>b)</i> Exemplo de célula cilíndrica (Bankole et al., 2013).....	6
Figura 2.3 – <i>a)</i> Estrutura de uma célula prismática; <i>b)</i> Exemplo de célula prismática (Pritchard, 2009).....	7
Figura 2.4 – <i>a)</i> Estrutura de uma célula de bolsa; <i>b)</i> Exemplo de célula de bolsa (Shepard, 2022). 7	
Figura 2.5 – Exemplo de bateria chumbo ácido para Veículos Elétricos (EverExceed, 2022).	9
Figura 2.6 - Exemplar de bateria NiMH para veículos híbridos plug-in (NeoCharge, 2022).....	11
Figura 2.7 – <i>a)</i> Bateria utilizada para o projeto, vista de topo; <i>b)</i> bateria utilizada para o projeto, vista lateral.	14
Figura 3.1 – Tipologias de BMS – <i>a)</i> Centralizado; <i>b)</i> Modular; <i>c)</i> Mestre-Escravo; <i>d)</i> Distribuído, adaptado de (Pistoia & Liaw, 2018).	16
Figura 3.2 – Comportamento das sondas PTC E NTC (Frank Randy, 2021).....	18
Figura 3.3 – Exemplo de sensor de Hall (Sonnecy, 2022).....	19
Figura 3.4 – Circuito de balanceamento passivo - <i>Shunt</i> Resistivo.....	24
Figura 3.5 – Circuito de balanceamento passivo - <i>Shunt</i> Resistivo com comutação.....	25
Figura 3.6 – Circuito de balanceamento ativo – Condensadores comutados.....	25
Figura 3.7 – Circuito de balanceamento ativo – Condensadores Comutados por Dupla Camada.....	26
Figura 3.8 – Circuito de balanceamento ativo – Transformador Partilhado	27
Figura 3.9 - Circuito de balanceamento ativo – N Transformadores ligados em paralelo.....	28
Figura 4.1 – Circuito Integrado de Aquisição de Dados <i>a)</i> BQ76952; <i>b)</i> Max17852; <i>c)</i> LTC6813.....	30
Figura 4.2 – Exemplo de tipologia BMS com estrutura Mestre-Escravo (Andrea, 2010).....	31
Figura 4.3 – Codificação Manchester com <i>Data Nibble = 0h</i> (Integrated, 2018).....	32
Figura 4.4 – <i>a)</i> Transmissão UART; <i>b)</i> Receção UART (Integrated, 2020b).....	33
Figura 4.5 – Esquema Single UART com <i>Loopback</i> externo (Integrated, 2020b).	34
Figura 4.6 – Diagrama de Blocos do BMS desenvolvido, esquema Single UART com <i>loopback</i> externo.....	35
Figura 4.7 – Circuito de operação simplificado Max17841B, adaptado de (Integrated, 2018).....	36
Figura 4.8 – Esquemático da PCB de um módulo escravo (Autodesk Inc., 2022).....	37

Figura 4.9 – Configuração pinos MAX17852 ((Integrated, 2020b) pág. 35).	37
Figura 4.10 – a) <i>Bottom Layer</i> PCB, b) <i>Top Layer</i> PCB (Autodesk Inc., 2022).	38
Figura 4.11 – Propriedades da PCB (Autodesk Inc., 2022).	39
Figura 4.12 – <i>Bottom Layer</i> PCB: 1- <i>Battery Pack Interface</i> , 2-Max17852IC.	39
Figura 4.13 - <i>Top Layer</i> PCB: 1-UART UP, 2-UART LP, 3- <i>Alert Out</i> LP, 4- <i>Alert In</i> UP, 5- <i>Aux Input</i> , <i>Aux Output</i> , <i>Current Sensor Amplifier interface</i> (CSA, em JP1).	40
Figura 4.14 - Quatro placas BMS, em teste após montagem.	41
Figura 4.15 – Sensor de temperatura, NTC 10 k Ω	42
Figura 4.16 – a) Sensor de Corrente; b) <i>Layout</i> da placa para o conversor DC-DC; c) Placa com conversor DC-DC.	42
Figura 4.17 - Processos desenvolvidos durante o projeto	43
Figura 4.18 – Registo BALSCTRL (0X6F) ((Integrated, 2020b) pág. 310).	44
Figura 4.19 – Limite UV do balanceamento das células ((Integrated, 2020b) pág. 116).	46
Figura 4.20 – Registo BALCTRL (0X80) ((Integrated, 2020b) pág. 320).	47
Figura 4.21 – Registo BALSTAT (0X81) ((Integrated, 2020b) pág. 322).	48
Figura 5.1 – Verificação de soldaduras nas placas PCB: soldaduras deficientes.	49
Figura 5.2 – Teste de funcionamento da placa PCB.	50
Figura 5.3 – Aquisição de dados ADC em sequência, modo pirâmide (Integrated, 2020b).	50
Figura 5.4 – Leitura em tempo real das 40 células de bateria através do software Max17853 EV Kit.	51
Figura 5.5 – Fluxograma ciclo de medições e monitorização.	52
Figura 5.6 – a) Assemblagem da placa, b) Termografia realizada na placa CI.	56
Figura 5.7 – Aquisição de dados monitor série - Bloco de células 1.	57
Figura 5.8 – Registo de balanceamento verificado no monitor série do SW Arduino IDE - Bloco de células 1.	58
Figura 5.9 - Termografia realizada nas placas de CI durante o balanceamento.	59
Figura 5.10 – a) Célula XTAR 16340 650 mAh b) Bateria 2 utilizada para realização de testes. ..	61
Figura 5.11 – Valores de tensão verificados na bateria de testes T1, a) antes de iniciar o balanceamento, b) após terminar o balanceamento.	63
Figura 5.12 – Valores de tensão verificados na bateria de testes T2, a) antes de iniciar o balanceamento, b) após terminar o balanceamento.	64
Figura 5.13 – Fluxograma do processo de medições, monitorização e balanceamento.	66

Figura 5.14 – Equipamentos utilizados durante os testes.....	67
--	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características genéricas de uma célula de Chumbo-Ácido (Buchmann, n.d.).....	9
Tabela 2.2 – Características genéricas de uma célula de Níquel Hidreto Metálico (Buchmann, n.d.).	11
Tabela 2.3 – Características genéricas de três tipos de células de Iões de Lítio (Buchmann, n.d.).	13
Tabela 2.4 – Principais características da bateria usada	14
Tabela 3.1 – Balanceamento Passivo	23
Tabela 3.2 – Balanceamento Ativo	24
Tabela 4.1 – Circuitos Integrados de Aquisição de Dados analisados para construção do BMS..	29
Tabela 4.2 – Configurações UART (Integrated, 2020b).....	33
Tabela 4.3 – Modos de balanceamento de células ((Integrated, 2020b) pág. 111).....	45
Tabela 5.1 – Teste de aquisição de dados, através do monitor série da aplicação.	55
Tabela 5.2 – Características da bateria 2 utilizada durante os testes.....	61

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – <i>Duty-Cycle</i> de 50% e 100% com intervalos temporais num bloco de 10 células	60
Gráfico 2 – Teste de descarga de bateria 2 com potência de 30 W.	62
Gráfico 3 – Comportamento da tensão da bateria 2 durante o balanceamento, ensaio 1.....	63
Gráfico 4 – Comportamento da tensão da bateria 2 durante o balanceamento, ensaio 2.....	64
Gráfico 5 – Funcionamento dos MOSFETs durante o balanceamento.	65

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> – Conversor Analógico-Digital
ASIL D	<i>Automotive Safety Integrity Level D</i>
BMS	<i>Battery Management System</i> – Sistema de Gestão de Baterias
CC	Corrente Contínua
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> – Compatibilidade Eletromagnética
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i> – Veículo Elétrico Híbrido
LiFePO ₄	Lítio Fosfato de Ferro
NiCd	Níquel Cádmio
NiMH	Níquel Hidretos-Metálicos
NTC	Coeficiente de Temperatura Negativo
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> – Placa de Circuito Impresso
PEC	<i>Packet-Error Checking</i> – Verificação de Erro na mensagem
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> – Veículo Elétrico Híbrido Plug-in
PTC	Coeficiente de Temperatura Positivo
SoC	<i>State of Charge</i> – Estado de Carga
SoH	<i>State of Health</i> – Estado de Saúde
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> – Transmissor Receptor Assíncrono Universal
VCU	<i>Vehicle Control Unit</i> – Unidade de Controlo do Veículo
VEIL	Veículo Elétrico Isento de Licença
VEs	Veículos Elétricos

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha um papel fundamental no desenvolvimento industrial, na urbanização e no avanço económico, bem como na qualidade de vida de todo o ser humano. Em toda a Europa, os países foram afetados pela crise do Covid-19 e o plano de recuperação económica para esses países promove a mobilidade sustentável, a eficiência energética, a descarbonização e a bioeconomia. A transição para energias limpas deve ser destacada, especialmente na integração de eletricidade de fontes renováveis (Energy Agency, 2009). Os veículos elétricos, VEs, estão no centro da estratégia de mobilidade sustentável. A sustentabilidade pode ser alcançada quando a energia consumida para a produção e operação dos VEs é gerada por fontes de energia renováveis.

Os VEs reduzem o impacto ambiental, pois são construídos com baterias recarregáveis de longa duração (Energy Agency, 2009) e são muito mais eficientes em termos energéticos do que os veículos de combustão interna. De facto, os motores elétricos beneficiam de uma eficiência energética muito elevada, entre 90-95%, quando comparados com os motores de combustão, entre 20-35%. Os VEs neste momento, são a alternativa mais popular aos combustíveis fósseis. No futuro, este será o tipo de veículo predominante. São muito eficientes e a sua utilização não produz emissões diretas de partículas poluentes ou gasosas durante a sua operação (Energy Agency, 2021; P. G. Pereirinha, 2022).

No entanto, com o aumento de VEs em circulação, a procura por eletricidade aumentou, o que pode causar desequilíbrios entre a energia produzida e a energia consumida. A energia dos VEs deve ser gerida de forma a garantir a máxima eficiência desde a geração da energia até à roda. Apesar de os VEs e todas as tecnologias inerentes estarem em constante evolução, existem cuidados a ter com as baterias de tração, o que resulta na necessidade de uma correta monitorização e controlo adequado. Os sistemas de gestão de baterias, BMS são projetados para proteger e gerir o estado dos parâmetros da bateria, bem como o seu desempenho. Este é responsável por garantir condições normais de operação permitindo prolongar a vida útil da bateria. Os sistemas BMS são desenvolvidos com uma série de funções, nomeadamente monitorizar a carga e descarga das baterias (limites de tensão de operação, corrente máxima e temperatura de operação), realizar a equalização das células, analisar o Estado de Saúde (SoH) e o Estado de Carga (SoC), garantindo assim as condições normais de operação e o prolongamento da vida útil.

Existem várias tecnologias de baterias no mercado, sendo que as baterias de íões de lítio são atualmente as mais usadas em VEs, devido às suas notáveis vantagens e melhorias significativas de desempenho, nomeadamente densidade de energia relativamente alta e ciclos de vida longos com 80% de descarga profunda (Consulting, 2019).

O desenvolvimento do BMS apresentado neste trabalho, surgiu da possibilidade de reaproveitar uma bateria de um Veículo Elétrico Híbrido, HEV e Veículo Elétrico Híbrido Plug-In, PHEV,

podendo também ser aplicado em baterias de VEs com maior capacidade. Com efeito, no Laboratório de Acionamentos Eletromecânicos do DEE-ISEC existem várias baterias de veículos elétricos híbridos, HEV, e veículos elétricos *plug-in*, PHEV, fornecidas pela empresa PRIO.e (proprietária de estações de serviço e estações de carregamento elétrico), ao abrigo de um protocolo de colaboração com o ISEC. Em particular, o caso apresentado utiliza uma bateria de lítio fosfato de ferro, LiFePO_4 , composta por 40 células, retirada de um Mercedes-Benz PHEV. Este modelo de bateria foi aplicado nas gamas 350e e 500e. O objetivo é utilizar esta bateria em projetos académicos ou aplicar na plataforma VEIL, Veículo Elétrico Isento de Licença. O VEIL é um pequeno VE desenvolvido no ISEC destinado à investigação e ao ensino. Consiste numa conversão de um pequeno veículo de combustão interna, a diesel, para VE. Trata-se de um LIGIER 162 GL, pesa aproximadamente 350 kg, atualmente equipado com motor elétrico de indução de 400V, 50 Hz, 4 kW, 2860 rpm (P. Pereirinha et al., 2013; P. G. Pereirinha et al., 2009).

Com este objetivo, foi necessário desenvolver um BMS, começando pelo estudo do tipo de BMS a utilizar. Inicialmente, foram abordados os componentes e o *layout* da placa PCB, *Printed Circuit Board*, com a finalidade de criar placas de pequena dimensão, sendo este um processo bastante minucioso. Estas PCBs são compostas por duas camadas, *layers*, e durante a realização do seu projeto/desenho, *layout*, existiu o cuidado de separar os componentes de potência dos componentes de comando e comunicação para evitar ruídos e interferências eletromagnéticas.

Após este Capítulo introdutório, este documento está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 aborda alguns conceitos técnicos sobre baterias e descreve os tipos de baterias de veículos elétricos, com maior ênfase na tipologia da bateria utilizada neste projeto. O Capítulo 3, apresenta os tipos de sistemas de gestão de baterias, qual o seu propósito, quais as suas funções, realçando os tipos de estruturas existentes no mercado e os diferentes tipos de balanceamento. O Capítulo 4, descreve a evolução do projeto, relatando cada etapa e os elementos essenciais para o funcionamento do BMS. Adicionalmente são abordados os protocolos de comunicação que estão implementados no projeto, onde intervêm e qual a finalidade de cada protocolo. Aqui também é relatado quais os parâmetros necessários programar para realizar um balanceamento controlado e em segurança. No Capítulo 5, são apresentados os resultados de alguns testes desenvolvidos. Por último, o Capítulo 6 finaliza este relatório com as conclusões e trabalhos futuros a realizar.

De referir também que durante o desenvolvimento deste projeto, foi realizado o artigo “*Development of a Battery Management System for Electric Vehicle’s Batteries Reuse*” (Neto et al., 2022), aceite e apresentado na conferência EAI SESC 2022 - *4th EAI International Conference on Sustainable Energy for Smart Cities* (inicialmente prevista para Braga entre 16 a 18 de novembro de 2022, mas acabando por funcionar totalmente *online*).

2 ESTADO DA ARTE DAS BATERIAS

As variações do fabrico de cada célula de bateria, bem como as variações na capacidade e as diferenças nas temperaturas de utilização de cada célula dentro da bateria de tração e nas suas auto-descargas, provocam desequilíbrios nas células das baterias, podendo resultar em alterações da resistência ou da capacidade interna. Quanto maior o número de ciclos, maior o desequilíbrio entre as células e, portanto, um conjunto de células pode ter tensões diferentes entre si, causando diferentes SoCs. Sabendo que idealmente não deve existir desequilíbrios entre células, confirma-se que este desequilíbrio provoca desperdícios de energia da bateria. Além disso, o desequilíbrio entre células leva ao envelhecimento, pois devido às diferenças existentes nos seus parâmetros, em comparação com células vizinhas, existem células que podem sofrer descarga profunda ou sobrecarga. Igualmente, nas células, ocorrem desequilíbrios de temperatura, diferenças de tensão, resistência interna e capacidade, contribuindo para um menor tempo de vida útil da bateria. Atendendo às razões enunciadas anteriormente, é clara a necessidade da utilização de sistemas de gestão de baterias, uma vez que quando empregados permitem como funções principais monitorizar e controlar os parâmetros de funcionamento das células, permitindo desta forma medir a tensão, corrente e temperatura das células ou conjuntos de células. Um BMS não só controla as condições operacionais, mas também prolonga o tempo de vida útil da bateria e garante a segurança das células. Um módulo de BMS completo também fornece uma estimativa precisa do SoC e SoH para o módulo de gestão de energia.

Os tipos de químicas e tecnologias de baterias a ser utilizadas necessitam de ser analisados para o desenvolvimento do BMS, de modo a procurar a melhor solução, verificando as vantagens e desvantagens entre as diversas tecnologias. Esta análise, permite identificar as tipologias de controlo e as tecnologias de balanceamento mais eficazes para a tecnologia da bateria a utilizar.

2.1 Conceitos

De forma a compreender a qualificação e diferenciação entre os diversos tipos de baterias é necessário definir alguns conceitos:

Tensão da célula/bateria (V) – Diferença de potencial entre os terminais da célula ou bateria, o equipamento de medidas utilizado é o voltímetro; este valor depende do estado de carga (SoC);

Capacidade (Ah) – Define a corrente elétrica total que uma bateria é capaz de fornecer num dado período temporal;

Energia Específica (Wh/kg) – Denominado também como densidade gravimétrica de energia, define a relação entre a quantidade máxima de energia armazenada na bateria e a sua massa;

Potência Específica (W/kg) - Relação entre a potência máxima que uma bateria pode fornecer e a sua massa;

Densidade de Energia (Wh/l ou Wh/dm³) – Relação entre a quantidade de energia máxima armazenada na bateria e o seu volume;

Densidade de Potência (W/l ou W/dm³) – Relação entre a potência máxima que uma bateria pode fornecer e o seu volume;

Taxa-C (*C-Rate*) – É a relação entre a corrente de carga ou descarga (A), e a capacidade (Ah) de uma bateria. Por exemplo, uma bateria de 2 Ah pode fornecer uma corrente de 2A durante 1 hora. Neste caso a bateria estaria a fornecer corrente a uma *C-Rate* de 1 C;

Ciclos de vida - Número de ciclos que uma bateria pode ser carregada e descarregada, sob condições específicas, antes da sua capacidade disponível atingir um valor mínimo (normalmente 80% ou 70% da capacidade nominal);

Tensão de Corte (*Cut-off Voltage*) – É a tensão mínima, especificada pelo fabricante, até à qual a bateria pode ser descarregada sem ficar danificada;

Taxa de Auto-descarga – É a perda de energia armazenada, geralmente expressa em percentagem da capacidade, por mês;

Efeito de memória – É um fenómeno que ocorre nas tecnologias de baterias mais antigas (sobretudo NiCd), sendo necessário ter alguns cuidados para que a bateria não fique “viciada”. Para que isso não aconteça é necessário ter cuidado nos processos de carga /descarga, é necessário que o utilizador deixe a bateria descarregar sempre até à tensão mínima (*Cut-off*) e depois carregue até à tensão máxima. Este efeito é causado devido a alterações químicas e formação de cristais dentro da bateria que diminuem a capacidade máxima de descarga;

Resistência interna – Os valores de resistência diferem entre as diferentes células, esta também dependerá do estado de carga da bateria (SoC). A instabilidade térmica aumenta à medida que as perdas na carga/descarga são convertidas em calor. Com o aumento da resistência interna da bateria a eficiência desta também diminui. O valor da resistência interna em DC deve ser significativamente inferior ao da carga a aplicar à bateria (cerca de 1/10 ou inferior), caso este parâmetro não seja cumprido, a queda de tensão provocada pela corrente de descarga consumida pela carga vai limitar o tempo de serviço da bateria.

2.2 Constituição de uma célula de bateria

As baterias são compostas por uma ou mais células eletroquímicas ligadas em série, em paralelo ou numa junção de ambas. As baterias possibilitam armazenar energia elétrica sob a forma de energia química.

Na Figura 2.1, estão representados os componentes que constituem uma célula eletroquímica, bem como o processo de carga/descarga. De seguida será abordado o funcionamento de cada um dos componentes (Henk Jan Bergveld et al., 2002).

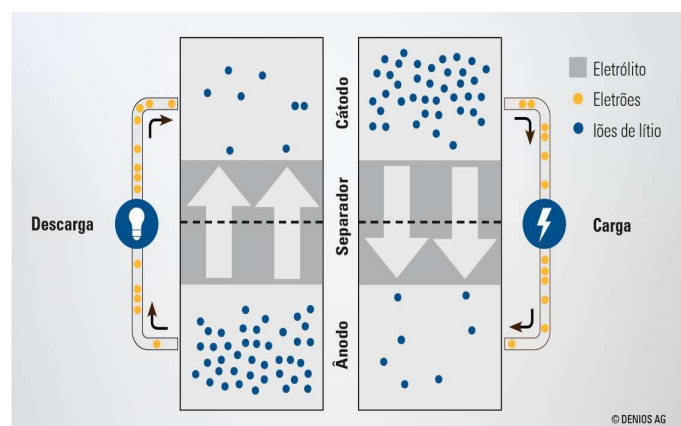


Figura 2.1 – Esquema ilustrativo dos constituintes de uma célula eletroquímica (Denios, 2021)

Ânodo

No processo de descarga, o eletrodo negativo entrega elétrons ao circuito externo e é oxidado durante a fase eletroquímica da reação. Uma reação eletroquímica simultânea ocorre no eletrodo positivo. No processo de carga, o eletrodo negativo é reduzido electroquimicamente.

Cátodo

No procedimento de descarga, o eletrodo positivo aceita elétrons do circuito externo e é reduzido durante a reação eletroquímica. Com a carga, o eletrodo positivo é oxidado e cede os elétrons. O cátodo é formado em placa ou espiral.

Eletrólito

Meio onde ocorrem as trocas de cargas, entre o ânodo e o cátodo. O eletrólito deve ter alta condutividade iónica, mas baixa condutividade elétrica para os elétrons de modo a evitar, ou pelo menos minimizar, o efeito de auto descarga das baterias.

Separador

Camada de isolamento físico que separa os eletrodos. O separador deve ser constituído por um material não condutor para elétrons, mas que permita a passagem dos íons do eletrodo positivo para o negativo, prevenindo curto-circuitos.

2.3 Tipos de Encapsulamento

Os materiais que compõem a bateria permitem armazenar a energia e, deste modo, a química principal da célula tem um papel fundamental no desempenho da célula em geral. Atualmente as células estão disponíveis com diversas características, tendo a engenharia evoluído de forma a obter melhores desempenhos das mesmas. O armazenamento de energia precisa de ser projetado de forma a permitir que estes sistemas retenham a carga, contudo, deverão manter a estrutura base sem que sofram alterações físicas. De seguida, serão apresentados os três principais tipos de encapsulamento usados em baterias de VEs (Chen et al., 2020a; TRUMPF, n.d.).

2.3.1 Cilíndricas

A forma mais utilizada de célula de íões de lítio é a cilíndrica. No ramo automóvel o formato mais comum é o 21700, ou seja, 21 mm de diâmetro por 70 mm de comprimento. Devido ao seu tamanho, este tipo de célula é limitado em termos de quantidade máxima de carga, o que significa que são necessárias muitas células para um elevado desempenho. Em contraste com outros tipos de formatos, as células cilíndricas têm apenas um ânodo e cátodo, os quais são enrolados num rolo cilíndrico isolados pelo separador. Na sua utilização numa bateria, o facto da célula ser redonda resulta numa perda considerável de espaço.

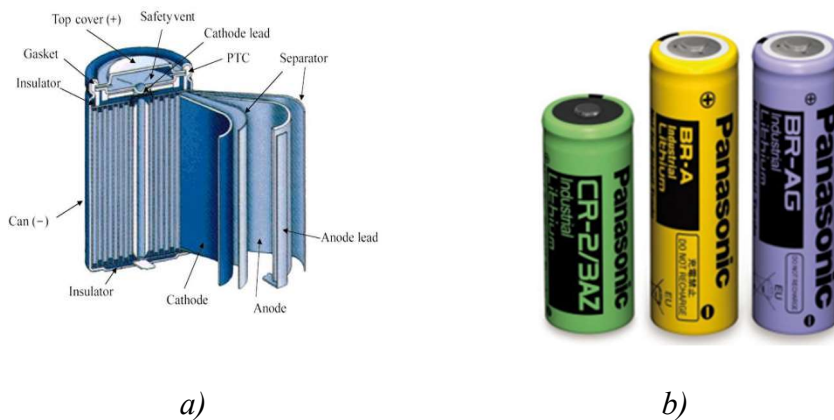
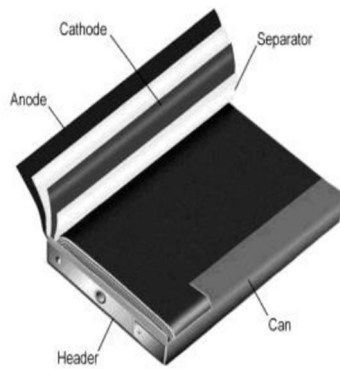


Figura 2.2 – a) Estrutura de uma célula cilíndrica; b) Exemplo de célula cilíndrica (Bankole et al., 2013).

2.3.2 Prismáticas

Outra forma comum é a prismática. Normalmente o alumínio ou o aço utilizam-se como exterior das células prismáticas de íões de lítio, embora existam também com polímeros. O facto de ser um compartimento metálico, garante a estabilidade estrutural, a robustez mecânica e proteção contra humidade. Desta forma, permite a aplicação de orifícios com objetivo de aliviar as dilatações. As células prismáticas permitem um embalamento mais eficiente relativamente ao espaço quando comparadas com as homónimas cilíndricas.

Devido à sua densidade de energia potencialmente mais alta, é necessária uma estrutura modular mais complexa. A grande área de superfície torna-se benéfica devido à gestão térmica. Atualmente é o formato de células mais usado nos veículos elétricos.



a)



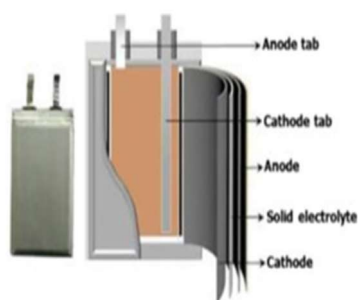
b)

Figura 2.3 – *a)* Estrutura de uma célula prismática; *b)* Exemplo de célula prismática (Pritchard, 2009).

2.3.3 Bolsa

As células de bolsa são inseridas dentro de uma embalagem de plástico e alumínio macio. Os coletores de corrente são soldados internamente aos pontos terminais, permitindo a conexão externa. É a célula mais fácil de fabricar, em comparação com os restantes tipos de células já acima mencionados, mas requer mais cuidado aquando do embalamento do pack de células, devido à segurança.

Devido ao tamanho é facilmente escalonável, e por esse motivo atualmente é a segunda construção de células mais comum no ramo automóvel.



a)



b)

Figura 2.4 – *a)* Estrutura de uma célula de bolsa; *b)* Exemplo de célula de bolsa (Shepard, 2022).

2.4 Baterias

No mercado atual estão presentes dois tipos de baterias: as primárias e as secundárias. As primárias, atendendo ao seu cariz não recarregável, não são adequadas à utilização em VEs. As secundárias, recarregáveis, têm menor impacto ambiental em comparação com as baterias descartáveis, sendo o custo inicial mais elevado, mas podem ser recarregadas e utilizadas muitas vezes, ficando o seu custo total um valor menos elevado. As baterias recarregáveis são compostas por uma ou várias células eletroquímicas.

Existe uma grande variedade de células eletroquímicas disponíveis no mercado. Estas podem conter diversos tamanhos e formatos e os seus nomes são definidos consoante os elementos químicos que as compõem. Estes podem ser Níquel Hidretos Metálicos (NiMH), Níquel-ácido (NiCd), Cloreto de sódio e Níquel (Na-NiCl), Chumbo-ácido (PB) e iões de lítio. Estes tipos de baterias diferem consoante os tipos de iões, as matérias no eletrodo e os eletrólitos associados em cada célula.

2.4.1 Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido, foram as primeiras baterias a ser usadas como fonte de energia nos primeiros VEs, em 1895. Neste tipo de baterias, o material no eletrodo positivo é o dióxido de chumbo (PbO_2) e no eletrodo negativo é o chumbo metálico (Pb). O sulfato de chumbo (PbSO_4) é o material que resulta da descarga, sendo este igual em ambos os eletrodos. Durante a descarga é provocada uma diminuição da tensão devido à resistência interna, à polarização e ao esgotamento do material (Michael, 2010).

Este tipo de baterias tem uma tensão nominal de 2V por célula e densidade de potência alta mas, em contrapartida, têm baixa densidade gravimétrica de energia e baixa potência específica, devido aos materiais usados para a sua construção. Estas baterias continuam a ser bastante usadas em várias aplicações, devido ao baixo custo e facilidade de produção (Automotive, 2020).

A bateria da tecnologia de chumbo-ácido é bastante segura, uma vez que suporta sobrecargas, sendo uma vantagem em relação a outros tipos de tecnologias.

Quando funcionarem a temperaturas inadequadas reduzem significativamente a capacidade, tal como na maioria das tecnologias. Existem outros motivos que podem levar à sua deterioração, sendo uma delas o fenómeno da sulfatação que ocorre devido à formação de sulfato de chumbo em excesso. Isto pode acontecer devido ao eletrólito estar baixo, deixar a bateria descarregada durante muito tempo, ou por ser efetuada uma descarga abaixo da tensão de corte da bateria.

Existem três tipos de baterias que dominam as aplicações do chumbo-ácido: são as baterias SLI, as baterias para sistemas de tração e as baterias estacionárias.

As baterias SLI, *Start Lighting Ignition*, ou de ignição, são usadas normalmente em automóveis com motor de combustão interna e têm o poder de fornecer correntes elevadas

(elevada densidade de potência) durante alguns segundos. Não necessitam de alta densidade de energia, pois estas recarregam através do alternador durante o funcionamento do veículo. As baterias para sistemas de tração elétrica, como a da Figura 2.5, devem possuir uma elevada densidade de energia e ser capazes de realizar ciclos de descarga profundos, de modo a não prejudicar o tempo de vida das baterias. São baterias usadas em veículos elétricos, sendo estes, por exemplo, empilhadores, carros de golf e cadeiras de rodas elétricas. Nas baterias de sistemas estacionários, a sua característica dominante é manterem-se carregadas durante longos períodos de inatividade e são usadas, por exemplo, na iluminação de emergência e UPS (Michael, 2010).



Figura 2.5 – Exemplo de bateria chumbo ácido para Veículos Elétricos (EverExceed, 2022).

Na Tabela 2.1, é possível verificar as características genéricas de uma célula de Chumbo-Ácido.

Tabela 2.1 – Características genéricas de uma célula de Chumbo-Ácido (Buchmann, n.d.)

Especificações	Bateria Chumbo ácido
Energia específica (Wh/kg)	30-50
Ciclos de vida (80% de descarga)	200-300
Tempo de Carga Rápida (h)	8-16
Taxa de Auto-Descarga (mês)	5%
Tolerância a Sobrecarga	Alta
Tensão Nominal (por célula)	2 V
Segurança de Utilização	Elevada - É tolerante a sobrecargas

2.4.2 Níquel Hidreto Metálico

As baterias de NiMH surgiram como uma melhoria às baterias de Níquel Cádmio (NiCd), visto que o cádmio é tóxico. Usam o mesmo material no eletrodo positivo que as de NiCd, o Níquel Oxi-Hidróxido (Ni(O)OH), sendo que a principal diferença se prende com a utilização de uma liga metálica no eletrodo negativo. O desenvolvimento iniciou-se por volta de 1967, mas a utilização desta tecnologia iniciou-se, por volta de 1980, com a descoberta de novas ligas metálicas que tornaram estas baterias estáveis.

A relação entre a energia/peso é um fator favorável em relação às baterias NiCd. No entanto, uma vez que ao não serem exatamente iguais, é necessário ter em consideração que estas baterias não devem ser totalmente descarregadas, caso contrário, as células podem reverter a sua polaridade, passando a bateria a ter polaridade negativa.

Apresentam uma maior densidade de energia do que as de NiCd, o que as torna mais adequadas para aplicações portáteis. Tal como nas baterias de NiCd, a tensão nominal é de cerca de 1,25 V, podendo registar-se valores de tensão entre 0.9–1.0 V e 1,5 V caso a bateria esteja descarregada ou totalmente carregada.

A taxa de auto-descarga destas baterias é superior comparativamente às baterias NiCd, significando que perde mais rapidamente a sua carga armazenada, sendo que essa descarga pode ser influenciada pela temperatura do local.

Quando as baterias de NiMH foram lançadas no mercado, uma das suas características principais usadas para promover esta tecnologia, foi o facto de não possuírem “efeito de memória”. Uma das principais razões para esta diminuição no efeito de memória, é a eliminação do cádmio.

Em suma, as principais vantagens deste tipo de baterias, são o facto não serem tão poluidoras devido a não utilizarem Cádmio, possuírem ainda uma maior densidade de energia e sofrerem menor efeito memória em comparação com as de NiCd. É também, importante mencionar a facilidade de armazenamento e transporte. As desvantagens são, por exemplo, realizarem menos ciclos de carga/descarga que as NiCd, a tolerância a sobrecargas é limitada e se forem realizadas descargas com correntes elevadas regularmente diminuem o tempo de vida útil da bateria (Buchmann, n.d.).



Figura 2.6 - Exemplar de bateria NiMH para veículos híbridos plug-in (NeoCharge, 2022).

A tecnologia de baterias referida na Figura 2.6, teve grande interesse na utilização em veículos elétricos e híbridos, e também, pelo facto de ser uma alternativa às baterias de NiCd; podem-se ver as suas especificações na Tabela 2.2. Esta tecnologia de baterias foi implementada no EV1 da General Motors, e posteriormente adotada pela Toyota nos seus modelos híbridos até muito recentemente.

Tabela 2.2 – Características genéricas de uma célula de Níquel Hidreto Metálico (Buchmann, n.d.).

Especificações	Bateria de NiMH
Energia Específica (Wh/kg)	60-120
Ciclos de Vida (80% de descarga)	300-500
Tempo de Carga Rápida (h)	2-4
Taxa de Auto-Descarga (mês)	30%
Tolerância a Sobrecarga	Baixa
Tensão Nominal (por célula)	1,25 V
Segurança de Utilização	Média – Necessita de alguns dispositivos de segurança

As baterias NiMH têm sido substituídas por baterias de iões de lítio, embora apresentem como vantagens o baixo custo e o facto de serem mais seguras (Buchmann, n.d.; Michael, 2010).

2.4.3 Iões de Lítio

As baterias de íons de lítio consolidaram-se como a tecnologia de referência no mercado mundial dos veículos elétricos. A comercialização iniciou-se pela primeira vez em 1991. As principais referências são os equipamentos eletrônicos, onde rapidamente se concluiu que este tipo de bateria poderia tornar-se padrão para todos os equipamentos portáteis que continham baterias recarregáveis, tendo vindo a substituir assim tecnologias com menos performance, tais como NiCd e NiMH. Estas baterias são projetadas como um conjunto de células individuais, que ligadas entre si realizam uma bateria, sendo monitorizadas por um circuito eletrônico dedicado. O número de células, o tamanho de cada célula e a forma como estão dispostas determinam a tensão fornecida pela bateria e a sua capacidade, ou seja, a quantidade de eletricidade que é capaz de armazenar.

Em termos de composição, as baterias de íons de lítio utilizam no eletrodo negativo materiais de carbono, sendo a grafite o mais usado. A escolha prende-se com o facto de que a grafite permitir uma corrente de descarga maior e manter a temperatura controlada durante o processo carga/descarga. No eletrodo positivo são usados óxidos de metais ou compostos de fosfato. Os tipos de materiais mais comuns são o óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2), o óxido de lítio-manganês (LiMnO_4), o óxido de lítio níquel-manganês-cobalto (LiNiMnCoO_2), o lítio fosfato de ferro (LiFePO_4) e óxido de lítio níquel cobalto alumínio (LiNiCoAlO_2) (J. Huang, 2020; Michael, 2010).

A tensão numa célula de íons de lítio depende do tipo de material em que os eletrodos são constituídos. Atualmente, os valores mais comuns da tensão nominal variam entre 3,6 V e 3,8 V. Estes valores são bastante diferentes das células de NiCd ou NiMH, que necessitariam de três células em série de modo a atingir estes valores de tensão nominal.

A principal razão para o sucesso em larga escala das baterias de íons de lítio, está essencialmente na densidade de armazenamento que a tecnologia permite. Quando comparada com as outras baterias, uma bateria de íons lítio oferece densidade de armazenamento cerca de dez vezes mais do que uma bateria de chumbo-ácido. Estas baterias possuem densidade de energia muito superior às baterias de NiCd e NiMH, portanto, oferecem a mesma autonomia num tamanho muito mais pequeno. Atualmente uma célula do tipo, níquel manganês cobalto, NMC, tem uma densidade de energia entre os 230 e os 250 Wh/kg, no caso das baterias utilizadas pela Tesla, níquel cobalto alumínio, NCA, oferece cerca de 320 Wh/kg.

Estas baterias representam atualmente o melhor compromisso entre capacidade, volume e massa, no setor de mobilidade elétrica. O foco está no desenvolvimento de materiais catódicos positivos, uma vez, que têm uma grande função a desempenhar na densidade de energia específica geral. Este tipo de baterias oferece “alta tensão”, fácil recarga e durabilidade. Permite assim, cenários de utilização que possibilitam um longo ciclo de vida, em conciliação com os princípios da economia. De realçar a importância na estabilidade térmica e segurança que este tipo de baterias oferece. Possibilitam cargas rápidas, bem como redução do uso de matérias-primas, processos sintéticos e uso de materiais de baixa toxicidade. Em contrapartida, estas baterias não podem ser descarregadas totalmente podendo causar danos irreversíveis, pelo

que existe um circuito de proteção ligado à bateria para manter a tensão e a corrente nos seus limites. A carga destas baterias tem de ser bem monitorizada, pois são pouco tolerantes a sobrecargas ou sobredescargas. O preço é superior à das baterias de NiCd ou NiMH (Buchmann, n.d.).

Tabela 2.3 – Características genéricas de três tipos de células de Iões de Lítio (Buchmann, n.d.).

Especificações	Bateria de Lítio-Cobalto (LiCoO₂)	Bateria de Lítio-Manganês (LiMnO₄)	Bateria de Lítio-Fosfato-Ferro (LiFePO₄)
Energia Específica (Wh/kg)	150-200	100-150	150-220
Ciclos de Vida (80% de descarga)	500-1000	300-700	1000-2000
Tempo de Carga Rápida (h)	2-4	<1	<1
Taxa de Auto-Descarga (mês)	<10%		
Tolerância a Sobrecarga	Baixa		
Tensão Nominal (por célula)	3,6 V	3,8 V	3,3 V
Segurança de Utilização	Baixa – Muito pouco tolerantes a abusos na sua utilização		

As baterias a ser usadas neste Projeto de Mestrado encontram-se dentro desta tipologia de baterias, as baterias LiFePO₄. Conforme mencionado na Tabela 2.3, são uma opção dentro das baterias de iões de lítio. No final dos anos 90, foi descoberto que o fosfato poderia ser usado como material catódico nas baterias de lítio recarregáveis, oferecendo bom desempenho eletroquímico com baixa resistência. Oferece como benefício alta corrente nominal, boa estabilidade térmica, longos ciclos de vida útil e maior segurança.

Quando sujeitas a tensão elevada por longos períodos, são mais tolerantes que outros sistemas de baterias de iões de lítio. Estas baterias têm uma taxa de auto-descarga de cerca de 3 % ao mês, podendo provocar desequilíbrios com o envelhecimento. Necessitam de mais atenção, e deste modo usar sistemas de monitorização mais eficazes. Não são tolerantes às humidades, reduzindo drasticamente a sua longevidade (Buchmann, n.d.; Chen et al., 2020b).

2.4.4 Bateria Utilizada

A Bateria que será utilizada para implementação do BMS da tipologia LiFePO_4 , foi retirada de um Mercedes-Benz PHEV. Este modelo de bateria foi aplicado nas gamas 350e e 500e, composta por 40 células, Figura 2.7.



a)



b)

Figura 2.7 – a) Bateria utilizada para o projeto, vista de topo; b) bateria utilizada para o projeto, vista lateral.

É possível visualizar as principais características da bateria utilizada no projeto na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Principais características da bateria usada

Especificações	Lithium-Iron Phosphate Battery (LiFePO_4)
Energia (kWh)	2,9 kWh
Min/Max tensão células (V)	2 V/3,65 V
Tensão nominal módulo (V)	2x66 V
Corrente (Ah)	22,8 Ah
Número células em série	2x20S
Ânodo / Cátodo	Graphite / LiFePO_4

3 SISTEMA DE GESTÃO DE BATERIAS (BMS)

A gestão para um correto funcionamento da bateria é realizada pelo sistema BMS, *Battery Management System*, que está encarregue de monitorizar e controlar as células da bateria ou de um banco de baterias.

Realizando a monitorização do estado das baterias, este sistema comporta-se como medidor e controlador dos parâmetros necessários, de modo a garantir mais segurança das baterias e nos utilizadores das mesmas. Tem como principais objetivos realizar a proteção das células e da bateria contra danos, prolongar o tempo de vida útil das baterias e manter a bateria num estado de funcionamento que permita corresponder às necessidades do utilizador. De modo a evitar subcargas, sobrecargas, temperaturas elevadas e curto-circuitos, o circuito eletrónico do BMS controla o desempenho das células individualmente ou em grupo. Este controlo, resumidamente, processa-se da seguinte forma: quando um dos parâmetros anteriormente referidos sai dos limites programados, o circuito elétrico retira todas as permissões para realização de balanceamento e informa o utilizador através de alertas sobre o estado da bateria, prevenindo a ocorrência de falhas com maior dano ou mesmo acidentes. A gama de tensões de funcionamento da bateria dos veículos elétricos é variável, sendo que a capacidade depende da potência e autonomia do sistema. Para obter a tensão e a potência necessária para o veículo, é necessário a aplicação de células interligadas em série e ou paralelo. Contudo, quando existem várias células ligadas em série, poderá existir um desequilíbrio da tensão e resistência interna entre elas, podendo afetar o desempenho e o tempo de vida útil da bateria (Andrea, 2010).

3.1 Arquiteturas de BMS

Em termos de estrutura física de BMS, estas dependem do número de células utilizadas e das necessidades exigidas pelo sistema. As diferentes arquiteturas que podem ser adotadas são indicadas na Figura 3.1.

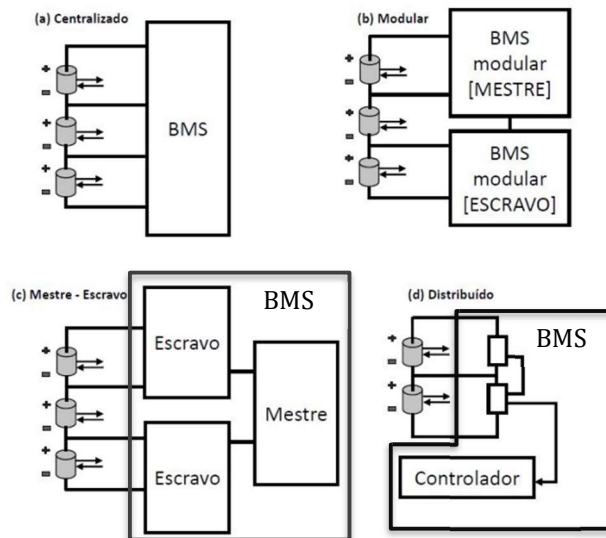


Figura 3.1 – Tipologias de BMS – a) Centralizado; b) Modular; c) Mestre-Escravo; d) Distribuído, adaptado de (Pistoia & Liaw, 2018).

- **Centralizada:** Numa estrutura Centralizada, Figura 3.1 a), todas as baterias estão ligadas ao mesmo módulo BMS, estando diretamente ligado a cada uma delas, sendo o único controlador. O controlador controla e monitoriza todas as funções executadas nas baterias ou bancos de baterias. Esta solução apresenta algumas vantagens, especialmente quando o sistema gerido é constituído por poucas células, sendo uma solução compacta e economicamente mais viável, pois necessita apenas de um sistema de gestão. A complexidade desta estrutura aumenta com a inserção de mais células, pois este fica limitado devido às conexões disponíveis no BMS e à capacidade de processamento do controlador (Andrea, 2010; Pistoia & Liaw, 2018).
- **Modular:** Na estrutura Modular, com uma estrutura semelhante à anterior, como se pode verificar na Figura 3.1 b), a diferença é que este é dividido em vários módulos idênticos, cada um com o seu respetivo conjunto de células a monitorizar. Normalmente neste tipo de estrutura um dos módulos é denominado de mestre, recebendo as comunicações dos restantes, designados de slaves
- . Quando comparada com a estrutura centralizada, a modular possuiu maiores vantagens - as ligações são mais fáceis de gerir e permite a colocação do módulo mais próximo das células a gerir, o que permite uma expansão mais simples. Contudo, atendendo ao número de módulos, tem um custo superior (Andrea, 2010; Pistoia & Liaw, 2018).

- **Mestre-Escravo:** Na arquitetura Mestre-Escravo, semelhante à Modular, conforme a Figura 3.1 c), os módulos escravos são semelhantes e cada um monitoriza um certo número de células. No entanto, o mestre, é diferente dos restantes módulos, pois este não adquire medições, apenas recebe as comunicações e a computação e distribui pelos restantes. O Mestre-Escravo possui as vantagens e desvantagens da estrutura Modular, todavia o custo do escravo tende a ser menor, pois, apenas monitoriza as células. Esta estrutura permite a sua expansão dependendo do Mestre, mas fica otimizado apenas para uma tecnologia de baterias (Andrea, 2010; Pistoia & Liaw, 2018).
- **Distribuída:** Na estrutura Distribuída, Figura 3.1 d), existem dois diferentes tipos de BMS, os Mestre, *Master*, e os Escravos, *Slave*. Por cada bateria ou grupo de baterias, existe um módulo escravo. Cada módulo é responsável pelo controlo da carga e descarga, monitorizando e realizando o tratamento do processo de equalização da bateria ou banco de baterias associadas. Os módulos escravos conectam-se com o módulo Master, que faz a gestão dos diversos módulos, bem como, a comunicação para a interface com o utilizador. Esta estrutura é aconselhada para aplicações com elevado número de baterias, bem como para situações em que seja previsível ou desejado aumentar o número de baterias. Embora seja o modelo que apresenta maior custo de implementação, é o que proporciona mais facilidade em reproduzir o número de células (Andrea, 2010; Pistoia & Liaw, 2018).

3.2 Monitorização e Segurança

Um BMS não serve apenas para monitorizar, mas também para promover a segurança das baterias e dos próprios utilizadores de VEs. Este dispositivo tem como base monitorizar a tensão, corrente e temperatura das baterias. (Chen et al., 2020a; Pistoia & Liaw, 2018)

Alguns periféricos funcionam apenas para uma tecnologia de baterias, mas estão dedicados à aplicação de medidas de segurança. Este tipo de componentes têm a capacidade de comunicar com outros. Existe uma vasta gama de fabricantes, que produzem circuitos integrados de modo a ficarem ajustáveis às necessidades e aplicações existentes no mercado.

É uma boa prática garantir as medidas de segurança nas baterias e quando os BMS são desenvolvidos à medida do projeto em causa, estas medidas podem ser inseridas no sistema sem recurso a equipamentos adicionais. Através da implementação de equipamento nas baterias, a atuação é mais rápida pelo que normalmente estas medidas são aplicadas para sobrecargas, descarga abaixo da tensão de corte e curto-circuitos. Este tipo de técnicas salvaguarda a bateria em caso de deficiência ou mau funcionamento do software, evitando que as baterias corram risco e não sejam colocadas em situações adversas.

De modo que estas medidas de segurança sejam eficientes, é necessário que o sistema de monitorização permita manter as baterias a funcionar nas condições ideais e, para isso, o sistema deve ter implementado equipamento que permita a medição da tensão, corrente e temperatura das baterias.

A medição de temperatura é realizada pela solução mais simples, sensores de temperatura também denominados por termístores. A temperatura é medida através da variação entre a resistência com a temperatura, sendo estes valores proporcionais. Os semicondutores podem ser denominados como PTC (Coeficiente de Temperatura Positivo) ou NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo). As PTC são sondas em que a resistência varia de forma positiva com o aumento da temperatura; no caso de diminuição do valor da resistência com o aumento da temperatura, chamam-se NTC. Na Figura 3.2 pode-se verificar os diferentes comportamentos dos sensores de temperatura PTC e NTC (Frank Randy, 2021).

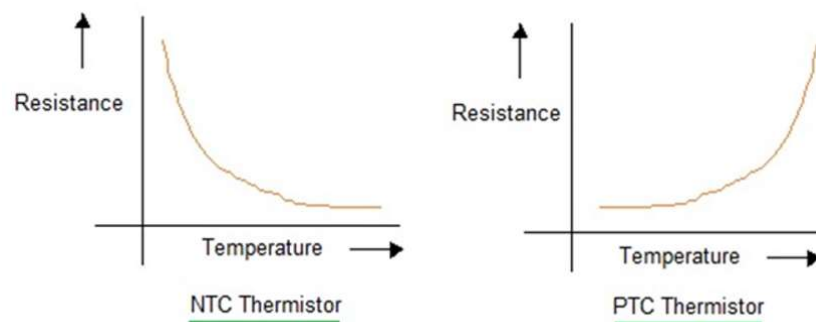


Figura 3.2 – Comportamento das sondas PTC E NTC (Frank Randy, 2021).

Normalmente são usadas sondas PTC com a configuração em ponte *Wheatstone*, a qual realiza a leitura por variação de resistência e transforma-a numa variação de tensão. Esta configuração torna a resposta do sistema mais linear.

Para efetuar a medição de tensão, existem várias soluções. Estas podem ser através de sensores de efeito Hall, medição direta ou optoacopladores. O sensor de efeito de Hall funciona de forma semelhante ao mesmo sensor para medição de corrente, sendo necessário aplicar uma resistência à saída de modo a ser possível realizar a sua leitura, possibilitando assim relacionar a corrente na saída com a queda de tensão no mesmo ponto.

A medição direta é normalmente realizada com recurso a um conversor analógico digital, ADC, e desta forma pode ser medida a tensão da bateria. Poderá ser usado um divisor de tensão de forma a ajustar os valores para a medição do ADC.

Os optoacopladores, permitem isolar, mas também obter a tensão de saída proporcional à de entrada, de acordo com o *datasheet* do respetivo componente.

De forma a realizar a medição da corrente, normalmente usam-se dois tipos: a medição da corrente através da resistência de *Shunt* ou a utilização de sensores de efeito de Hall (Instruments, 2019). O sensor de Hall, como o da Figura 3.3, tem como base o fenómeno de Hall de modo a efetuar a medição da corrente, relacionando a corrente medida na entrada e a grandeza convertida pelo sensor na saída. Esse valor convertido pode ser um valor de tensão ou de corrente. No caso do segundo é necessária a utilização de uma resistência de modo a ser possível medir a queda de tensão provocada pela corrente de saída.



Figura 3.3 – Exemplo de sensor de Hall (Sonnecy, 2022).

O sensor de *Shunt*, permite de forma simples e com baixo custo, medir a corrente, de forma precisa, que é percorrida num circuito. É implementado com uma resistência cuja queda de tensão é proporcional à corrente que a atravessa, sendo colocada entre a fonte de energia e a carga. Os valores típicos utilizados para a resistência de shunt são $100\mu\Omega$ e $50\mu\Omega$. Por norma, estes sensores são utilizados até uma corrente de 100 A, mas existem para valores superiores. As entradas de leitura destes sensores deverão permitir leituras de tensão diferencial.

3.3 Determinação do Estado de Carga - SoC

Num BMS, determinar o estado de carga (SoC), *State of Charge*, de uma bateria é um requisito importante. O SoC indica a capacidade disponível na bateria relativamente à sua capacidade nominal. Existe uma série de fatores complexos que são necessários para a determinação do SoC, tais como a temperatura, a taxa-C, a eficiência da carga e descarga, entre outros.

Uma correta e precisa determinação do SoC é fulcral para evitar problemas e otimizar a utilização das baterias. Utilizando um exemplo do quotidiano, a bateria de um *smartphone*, a falta de exatidão na determinação do estado de carga pode levar o utilizador a colocar o dispositivo a carregar mais vezes do que o necessário. Isto resultará numa deterioração precoce da mesma, bem como o desaproveitamento da sua capacidade energética total. Caso o controlo da carga das baterias dependa da informação do SoC, as baterias poderão não atingir a carga total ou ficar sobrecarregadas.

No âmbito da mobilidade elétrica, normalmente é realizada uma analogia entre o estado de carga das baterias e um depósito de combustível, na qual a indicação do SoC corresponde ao indicador do combustível.

Os sistemas para a determinação do SoC existem há quase tanto tempo como as próprias baterias secundárias. Na literatura encontram-se diversas técnicas para a determinação do estado de carga, podendo ser agrupadas em três categorias (Kim & Cho, 2011; Murnane & Ghazel, 2017; Pop et al., 2005):

- Medição Direta;
- Contagem de Coulomb;
- Sistemas Adaptativos.

3.3.1 Medição Direta

O método de Medição Direta, *Direct Measure*, consiste na medição direta de variáveis da bateria, tais como tensão, impedância ou tempo de relaxação após a aplicação de pulso de corrente. A temperatura também deve ser medida, visto as variáveis serem dependentes desta.

A principal vantagem destes métodos é o facto de não necessitarem de estar constantemente ligados, podendo a determinação do SoC ser efetuada assim que se ligue à bateria. Dentro da técnica de medições diretas existem diferentes abordagens, a mais utilizada é a medição direta da tensão.

A medição de tensão na bateria é um método bastante popular em aplicações como os telemóveis, não tendo um elevado nível de precisão. Determinar o SoC de uma bateria através da sua tensão, embora mais simples e menos dispendioso de implementar, pode ser bastante enganador. Isto deve-se ao facto de que, embora a tensão diminua durante a descarga, a relação entre a tensão da bateria e a carga restante varia consoante a temperatura, como com a taxa de

descarga. Estes fatores podem ser compensados, mas, deixa de ser um método simples e de baixo custo (Murnane & Ghazel, 2017; Pop et al., 2005).

3.3.2 Contagem de Coulomb

A Contagem de Coulomb, *Coulomb Counting*, é baseado na medição e integração dos valores da corrente elétrica durante a carga e descarga da bateria.

Tipicamente, é medida a queda de tensão numa resistência colocada em série com as baterias, calculada a corrente e integrando-a no tempo. A precisão deste método depende, entre outros fatores, da exatidão das medições da corrente durante a carga e descarga da bateria. Como os valores medidos são continuamente integrados, pequenos erros de medição podem resultar, ao longo do tempo, em grandes erros na determinação do SoC. Um erro comum é o *offset* que o circuito de medição pode introduzir. Embora este possa e seja compensado, existem sempre não linearidades que podem induzir pequenos erros (Murnane & Ghazel, 2017; Pop et al., 2005).

3.3.3 Sistemas Adaptativos

Os sistemas adaptativos, *Adaptive Systems*, são concebidos de forma a vencer a imprevisibilidade na determinação do SoC. A adaptabilidade do modelo é baseada na comparação de valores estimados com os medidos da bateria através de medições diretas, Contagem de Coulomb ou numa combinação de ambos. De entre as possíveis soluções para a sua implementação existem os Filtros de Kalman, Fuzzy Logic, Redes Neurais, entre outros (M. Huang et al., 2020; Kim & Cho, 2011).

3.4 Determinação do Estado de Saúde - SoH

O Estado de Saúde (SoH), *State of Health*, é um indicador que sinaliza a vida útil de uma bateria, apesar de não existir uma definição única de fim de vida útil da bateria. Este pode ser definido como uma diminuição significativa da capacidade de armazenar energia, fornecer e receber corrente e conservar a carga, relativamente à sua capacidade inicial. O aumento da resistência interna, a diminuição da capacidade, a taxa de auto-descarga e o envelhecimento da bateria devido aos ciclos de carga e descarga, provocam também a perda de rendimento, como resultado de alterações químicas na bateria. O SoH fornece informações sobre o estado do pack das células com base nas condições para que foi projetada e expressa-se em valor percentual. De forma resumida permite estimar o tempo de vida útil da bateria para uma certa aplicação e a necessidade de manutenção.(Kim & Cho, 2011; Pistoia & Liaw, 2018)

Através do conhecimento do SoH pode ser possível detetar danos que ocorram nas baterias, prevenir falhas e mau funcionamento devido a baterias desgastadas ou defeituosas, bem como, verificar quando alguma bateria necessita de ser substituída. A determinação do estado de saúde é complexa, visto que não corresponde a uma característica física. Existem alguns métodos para determinar o SoH, mas ainda é um processo complexo, devido a falta de métodos fiáveis e bem estabelecidos.

Uma possível solução passa pela medição da impedância a uma frequência única (geralmente 1 kHz), possibilitando identificar células defeituosas. Este procedimento tem sido indicado para a determinação de falhas, embora apenas forneça informação sobre a resistência dos elétrodos e do eletrólito. No caso de aplicar o mesmo processo a um espectro mais alargado de frequência, é possível obter informações sobre a degradação dos materiais ativos. Obtidos os valores da impedância para um vasto espectro de frequências existem diversos métodos para a obtenção do SoH (Pistoia & Liaw, 2018).

A solução mais simples, consiste na medição da capacidade da bateria e calcular a relação entre a capacidade atual e a capacidade nominal da mesma indicada pelo fabricante (Andrea, 2010; Pistoia & Liaw, 2018).

3.5 Balanceamento das Células

O balanceamento é um tema bastante importante de qualquer Sistema de Gestão de Baterias. As células não são exatamente iguais, mesmo sendo estas do mesmo fabricante e até do mesmo lote, terão ligeiras diferenças, sejam estas na impedância interna ou mesmo na capacidade, devido à sua natureza eletroquímica. Ao longo do tempo, as tensões entre as células podem começar a variar. No caso de um veículo elétrico, que possuem muitas células, a ocorrência de um desequilíbrio acarreta a aceleração da degradação da bateria. Dependendo de como está realizada a instalação e o próprio acondicionamento da bateria, provoca diferenças nas temperaturas nas células. A taxa de auto-descarga dos diferentes tipos de baterias também vai ser afetada pela temperatura ambiente onde estas estiverem inseridas. As anomalias apresentadas acima irão provocar desequilíbrios no SoH das células e aumentar o envelhecimento das mesmas.

Estando estas células ligadas em série, são percorridas pela mesma corrente, pelo que irá ocorrer uma sobrecarga da célula com o SoC mais elevado ou uma descarga elevada da célula com o SoC mais baixo. O que acontece nos casos mencionados acima é a capacidade útil ser inferior à capacidade nominal.

Os tipos de balanceamento podem ser classificados como passivo ou ativo. Os métodos de balanceamento passivo (Tabela 3.1) funcionam removendo a carga em excesso das células mais carregadas, através de uma resistência de shunt, passiva, até que a carga fique ajustada às células com menor carga da bateria. Esta resistência pode estar no modo fixo ou comutada. Os métodos ativos para balanceamento (Tabela 3.2), têm forma de passar a carga das células mais carregadas, para as células com carga mais baixa. Existem diversas formas de realizar este balanceamento, como por condensadores ou componentes indutivos, mas também por controlo de comutação de semicondutores ou conversores. As diferentes tipologias, variam de acordo com a complexidade, eficiência e tempo de resposta (Gallardo-Lozano et al., 2014).

Tabela 3.1 – Balanceamento Passivo

Balanceamento Passivo	
<i>Shunt</i> Resistivo	<i>Shunt</i> Resistivo com Comutação

Tabela 3.2 – Balanceamento Ativo

Balanceamento Ativo	
Condensador	Transformador
Condensadores Comutados	Transformador Partilhado
Condensadores Comutados por Dupla Camada	N Transformadores em paralelo

Segue-se a apresentação das principais possibilidades para balanceamento passivo.

3.5.1 *Shunt* Resistivo

O *Shunt* Resistivo, *fixed shunting resistor*, conforme já indicado acima, no Tabela 3.1, é um tipo de balanceamento passivo e consiste na inserção de uma resistência em paralelo em cada célula, como se pode verificar na Figura 3.4. O valor destas resistências deve ser igual de modo a que a bateria com tensão mais elevada dissipe mais energia do que a bateria com tensão mais baixa. Esta função não é controlada, visto que, não há possibilidade de controlar a energia dissipada, nem escolher quais as células que deverão dissipar energia; este tipo de balanceamento não tem sistema de controlo.

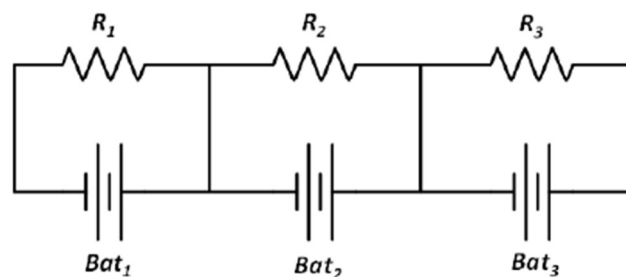
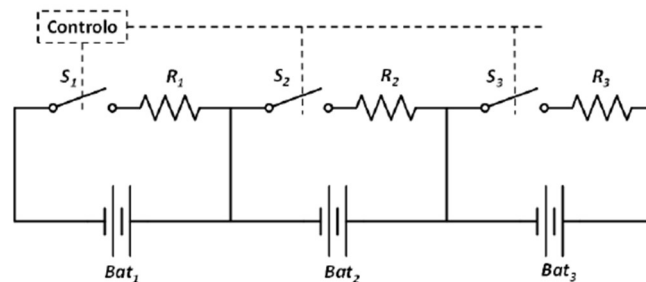


Figura 3.4 – Circuito de balanceamento passivo - *Shunt* Resistivo

Esta técnica necessita de um cuidado extraordinário para realizar a gestão térmica, resultado da dissipação de energia aquando do balanceamento. No entanto é um método simples e de baixo custo.

3.5.2 *Shunt* Resistivo com Comutação

O *Shunt* Resistivo com comutação, *switching shunting resistor*, presente no Tabela 3.1, é um upgrade ao *Shunt* Resistivo, uma vez que usa interruptores, para além das resistências usadas no modelo anterior. Também permite o controlo da gestão do balanceamento da carga das células.


 Figura 3.5 – Circuito de balanceamento passivo - *Shunt* Resistivo com comutação

Através de um microcontrolador para monitorizar e controlar, permite dissipar energia das células específicas ou redirecionar a corrente de carga. Desta forma, faz com que não existam células com sobrecarga, após estarem à tensão de fim de carga.

O método aplicado na Figura 3.5, em comparação com o *Shunt* Resistivo, já possibilita uma melhor gestão energética das baterias, dissipando assim menos energia. Este sistema é mais dispendioso e complexo, devido à utilização de um microcontrolador e dos interruptores de comutação, e também devido à necessidade de monitorização de alguns parâmetros.

Segue-se a apresentação das principais possibilidades para balanceamento ativo.

3.5.3 Condensadores comutados

O balanceamento por condensadores comutados, *switched capacitor*, é um tipo de equalização ativa, conforme mencionado na Tabela 3.2, que através de um ou vários condensadores realiza transferência de carga entre células vizinhas. Este sistema consiste na aplicação de um condensador entre duas células. Deste modo, quando existe comutação, os condensadores são carregados pelas baterias com maior carga e descarregados pelas que têm menor, devido às diferenças de tensão entre o condensador e as células.

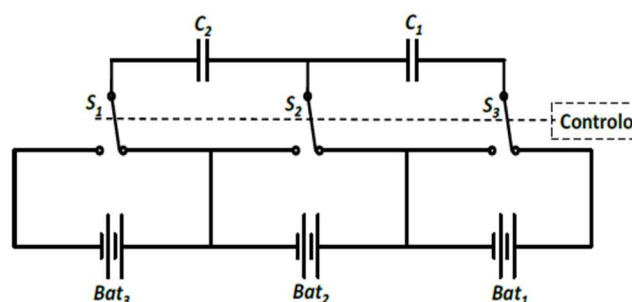


Figura 3.6 – Circuito de balanceamento ativo – Condensadores comutados

Neste tipo de montagem, é necessário ter em conta um tempo de pausa entre a comutação dos condensadores para evitar curto-circuitos.

O circuito da Figura 3.6 apresenta o balanceamento realizado por ciclos de comutação dos interruptores entre as células. O controlo realizado é simples visto não necessitar de sensores para determinar o estado de carga. Consequentemente, o utilizador não tem controlo no valor padrão do balanceamento, sendo conseguido pelo estado de carga das células vizinhas. Após

todas as células equalizadas, o consumo da energia será mínimo, visto que as tensões vão estar iguais em todas as células e, portanto, não existe necessidade de mais comutações dos interruptores, o que resulta que não existam perdas.

Embora seja um método simples, não é muito eficaz para células com muitas variações do SoC e não apresentem uma elevada variação de tensão, devido a que a transferência de carga está dependente da diferença de tensão entre as células, entre outros fatores. Existe também outra limitação, neste tipo de balanceamento, em especial onde existem células desequilibradas em extremidades opostas na bateria. Visto que a carga para ser distribuída terá de passar por todos os condensadores, esta técnica não é muito rápida.

3.5.4 Condensadores Comutados por Dupla Camada

O balanceamento de Condensadores Comutados por dupla camada, *double-tiered Switched Capacitor*, é uma melhoria à última tipologia apresentada. Este consiste na utilização de mais um condensador entre cada bloco de três células, desta forma facilitando a transferência de carga entre células mais afastadas, conforme é possível verificar na figura abaixo.

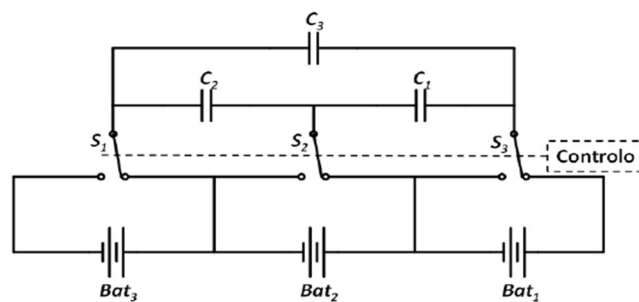


Figura 3.7 – Circuito de balanceamento ativo – Condensadores Comutados por Dupla Camada

O circuito da Figura 3.7 é muito semelhante ao que foi abordado anteriormente e, deste modo, deve existir uma temporização entre comutações para que sejam evitados os curto-circuitos nas células.

Este método permite que o balanceamento seja realizado mais rápido, visto que com a incrementação de uma camada de condensadores, cria-se mais um circuito para circular a carga, existindo a transferência de energia mais rápida entre células mais distantes. Em contrapartida, este método, torna-se mais dispendioso por necessitar de mais componentes. Tal como no método anterior, este balanceamento é controlado pelo valor de carga nas células adjacentes e não pelo utilizador.

3.5.5 Transformador Partilhado

O método de balanceamento por transformador partilhado, *shared transformer*, tem como principais vantagens a robustez, devido aos componentes utilizados e à velocidade como é possível efetuar o balanceamento.

Neste método é colocado um transformador com múltiplos secundários, sendo que cada secundário é associado a uma célula. O funcionamento é similar ao de uma fonte CC-CC *Flyback*. O interruptor fecha o circuito, a energia extraída vai ser armazenada no primário do transformador e esta é distribuída pelos secundários. Como o número de espiras é o mesmo e o secundário é comum, as tensões irão ser iguais, e a corrente de cada secundário é gerida pela tensão de cada bateria. Desta forma, as baterias com menor carga recebem mais energia, e equilibram as tensões. Os díodos servem para que apenas passe corrente quando os polos estiverem diretamente polarizados. Quando é detetado um desequilíbrio fora dos parâmetros, é interrompida a carga e é realizada uma equalização.

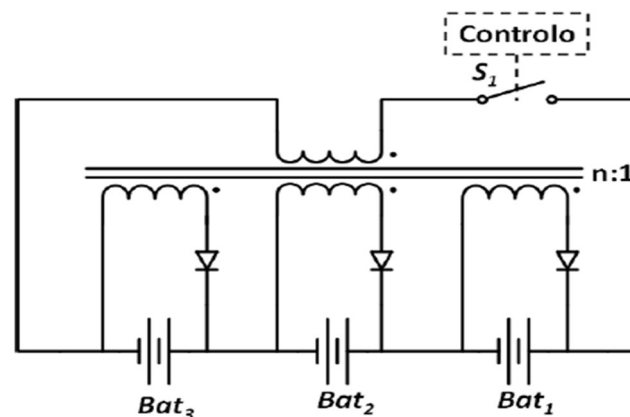


Figura 3.8 – Circuito de balanceamento ativo – Transformador Partilhado

O método usado na Figura 3.8, como indicado em cima, apresenta menos tempos de equalização, mas apresenta algumas desvantagens, sendo a principal, o custo mais elevado para a implementação do processo, sendo que no caso de querer fazer a equalização a n baterias, é necessário um transformador com n enrolamentos secundários. Caso se pretendam adicionar mais baterias é necessário substituir o transformador por outro devido ao n.º de enrolamentos do secundário.

3.5.6 N Transformadores em paralelo

O balanceamento de n transformadores em paralelo, consiste em múltiplos transformadores ligados em paralelo. São utilizados n transformadores para n baterias, com os enrolamentos dos primários ligados em paralelo e as células são ligadas a cada secundário do transformador. Com interação dos interruptores, é possível escolher onde se pretende colocar a energia. Tal como no método anterior, este balanceamento tem como princípio o funcionamento de uma fonte CC-CC *Flyback*.

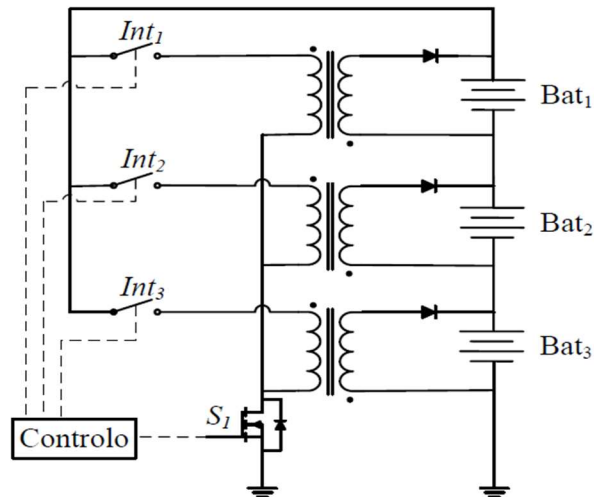


Figura 3.9 - Circuito de balanceamento ativo – N Transformadores ligados em paralelo

Na Figura 3.9, quando S_1 é colocado em funcionamento, um dos interruptores que seleciona a bateria que se deseja balancear, fica ativo e a energia obtida do banco será armazenada na indutância do transformador ativo. Quando S_1 é desligado, a energia é transferida para o secundário selecionado. Este sistema necessita de monitorização contínua da tensão, de forma que, quando for encontrado um desequilíbrio acima dos limites programados, seja iniciado o balanceamento das cargas das baterias.

Este método, proporciona redirecionar a energia para a bateria com a carga inferior. Assim, permite reduzir as perdas nos secundários dos transformadores, e equaliza a carga das baterias com maior eficácia.

Este sistema utiliza múltiplos transformadores ao contrário do método anterior, e desta forma, é mais fácil aplicá-los em bancos de baterias de maiores dimensões e até mesmo na adição de novas células.

4 DESENVOLVIMENTO DE UM BMS - CASO DE ESTUDO

A bateria utilizada para este projeto já continha um BMS; contudo uma vez que não havia acesso ao seu protocolo de operação, neste caso, foi necessário a instalação de um novo BMS. Inicialmente, pesquisou-se o mercado, para verificar qual o BMS que poderia atender ao estudo de caso. Os BMS comerciais não foram escolhidos porque muitos deles não oferecem uma solução de código *open-source* (aberto) nem permitem o acesso a todos os parâmetros pretendidos. Assim, optou-se por utilizar um circuito integrado de sistema de aquisição de dados dedicado e criar toda a estrutura do BMS de raiz.

O objetivo de desenvolver um novo Sistema de Gestão de Baterias, permite reutilizar a bateria, de forma a ter uma segunda vida e aproveitar o seu potencial. O BMS, monitoriza e controla o estado de todas as células de uma bateria ou de um banco de baterias. Este otimiza a capacidade da bateria durante a carga e descarga, garantindo a segurança e a vida útil da bateria.

4.1 Circuito Integrado de Aquisição Dados

Durante esta pesquisa, os circuitos integrados que se destacaram para as necessidades propostas estão descritos na Tabela 4.1, onde são apresentadas as suas principais características.

Tabela 4.1 – Circuitos Integrados de Aquisição de Dados analisados para construção do BMS

Integrado	BQ76952	Max17852	LTC6813
Nº Células	16	14	18
Tensão Máx. Tolerância	85 V	80 V	75 V
Corrente Balanceamento até	100 mA	650 mA	200 mA
Precisão de leitura, no pior caso	+/- 5 mV	+/- 4.5 mV	+/- 4.2 mV

Dos circuitos integrados pesquisados, Figura 4.1, é possível verificar que a estrutura física destes componentes é semelhante. No entanto, a estrutura dos diagramas funcionais é diferente, sendo a do Max17852 a mais completa e que oferece mais rigor na aquisição e tratamento de dados.

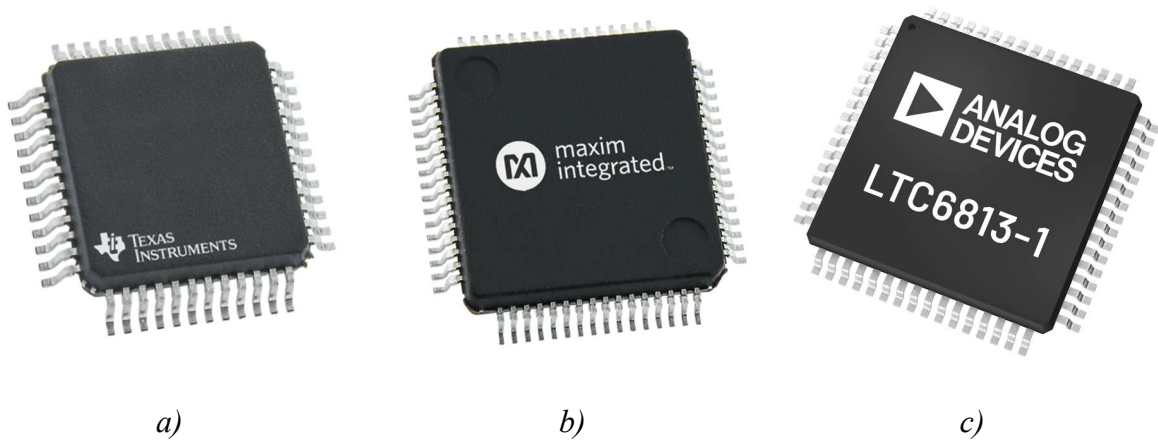


Figura 4.1 – Circuito Integrado de Aquisição de Dados a) BQ76952; b) Max17852; c) LTC6813.

O Max17852 foi escolhido, principalmente devido aos seguintes aspetos: a utilização de um amplificador para medição de corrente, pois com este dispositivo diminui a percentagem do erro e permite medições mais precisas. A versatilidade deste dispositivo permite adaptar a sua utilização a diversas aplicações devido à sua capacidade de medição de temperatura, tensão e corrente. A componente de segurança também foi considerada: o facto deste integrado cumprir com os requisitos ASIL-D e Failure Mode and Effect Analysis, FMEA, a sua capacidade de corrente máxima de balanceamento e o seu custo. No Anexo A, página 73, é possível visualizar o diagrama geral deste integrado. Verificou-se também que a Maxim Integrated possui um Kit de desenvolvimento, o Max17852 EV Kit, que permite demonstrar e variar os recursos e capacidades do Max17852. Este EV-kit, através de *jumpers* e interruptores, possibilita realizar algumas configurações de acordo com a necessidade do utilizador. Desta forma, o Max17852 EV Kit serviu como ponto de partida para o projeto da placa PCB em torno do CI *front-end* analógico.

4.2 Arquitetura do BMS

O modelo Mestre-Escravo foi escolhido, devido às suas características. Conforme mostrado abaixo na Figura 4.2, é possível verificar como esta tipologia está estruturada.

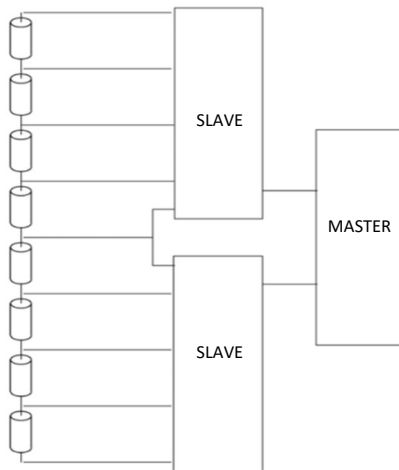


Figura 4.2 – Exemplo de tipologia BMS com estrutura Mestre-Escravo (Andrea, 2010).

Como referido em 3.1 - Arquiteturas de BMS, na estrutura Mestre-Escravo, existem dois tipos diferentes de módulos BMS, Mestre e Escravo. Esta estrutura é semelhante a um sistema modular. Utiliza vários módulos idênticos (escravos) e no sistema desenvolvido cada módulo monitoriza as 10 células. No entanto, o mestre é diferente dos módulos escravos e não realiza medições, apenas trata de processamento de informação e comunicações. Esta estrutura é recomendada para aplicações com grande número de células; no caso do Max17852, pode ter interligado até 32 dispositivos, podendo ser encadeados para gerir 448 células e monitorizar 128 temperaturas. Esta estrutura possibilita, no caso de ser desejado, aumentar o número de células (ou módulos), apesar de ser um modelo que apresenta um elevado custo de implementação (Pistoia & Liaw, 2018).

Tabela 4.2 – Configurações UART (Integrated, 2020b).

UARTCFG	UART CONFIGURATION	UART UP PATH	UART DOWN PATH
0b00	Single UART Interface with External Loopback	Active	Inactive (Buffered/Pass Through)
0b01	Single UART Interface with Internal Loopback	Active	Inactive (Buffered/Pass Through)
0b10	Single UART Interface with Differential Alert Interface	Active	Differential Alert
0b11	Dual UART Interface	Active	Active

A Figura 4.4, mostra como está desenhada fisicamente a transmissão e receção de dados. Durante a comunicação, a codificação de caracteres fornece um sinal gerado com um ciclo de funcionamento de 50%, de forma a garantir a estabilidade da carga nos condensadores de isolamento, fornecendo assim um sinal estável e sem ruído.

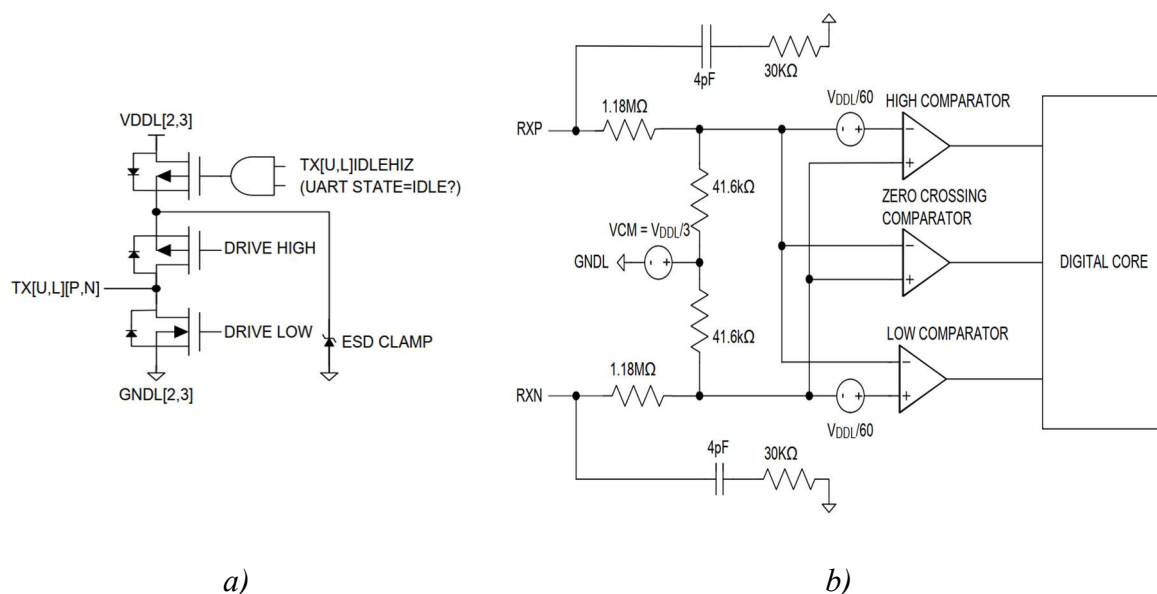


Figura 4.4 – a) Transmissão UART; b) Receção UART (Integrated, 2020b).

A transmissão de dados entre o microcontrolador e as PCBs que funcionam com o Max17852, é realizada através do Max17841B e os dispositivos irão receber os dados na porta RX inferior (RXL) e irão retransmiti-los através da porta TX superior (TXU) para a próxima porta RX inferior do próximo dispositivo. A interligação entre dispositivos pode ser verificada, conforme ilustra a Figura 4.5.

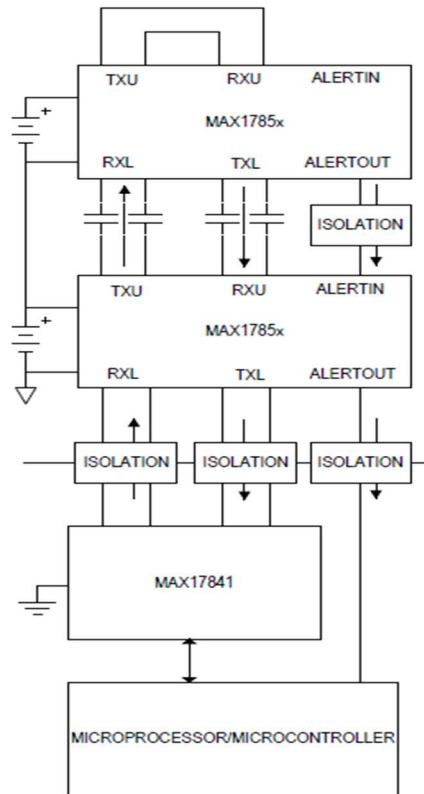


Figura 4.5 – Esquema Single UART com *Loopback* externo (Integrated, 2020b).

O sistema com *Loopback* externo, possui duas vantagens que merecem salientar:

- Quando o utilizador não configura o número de controladores conectados (módulos escravos do BMS), este tipo de comunicação é rápido a identificar o número de controladores ligados, devido ao parâmetro interno denominado de ALIVECNTEN;
- A corrente consumida entre todos os dispositivos ligados em cadeia fica desta forma igual em todos os módulos, uma vez, que cada módulo possui quatro portas do sistema Battery-management UART ativas (Integrated, 2020b).

O protocolo *Battery-Management* UART utiliza isolamento capacitivo da porta de comunicação e uma taxa de transmissão até 2 Mbps (detecção automática) com verificação de erros nas tramas de dados (Verificação de Erros em Pacotes de dados - PEC).

Na Figura 4.6 pode ver-se o diagrama de blocos final para este projeto, em particular os protocolos utilizados e o microcontrolador.

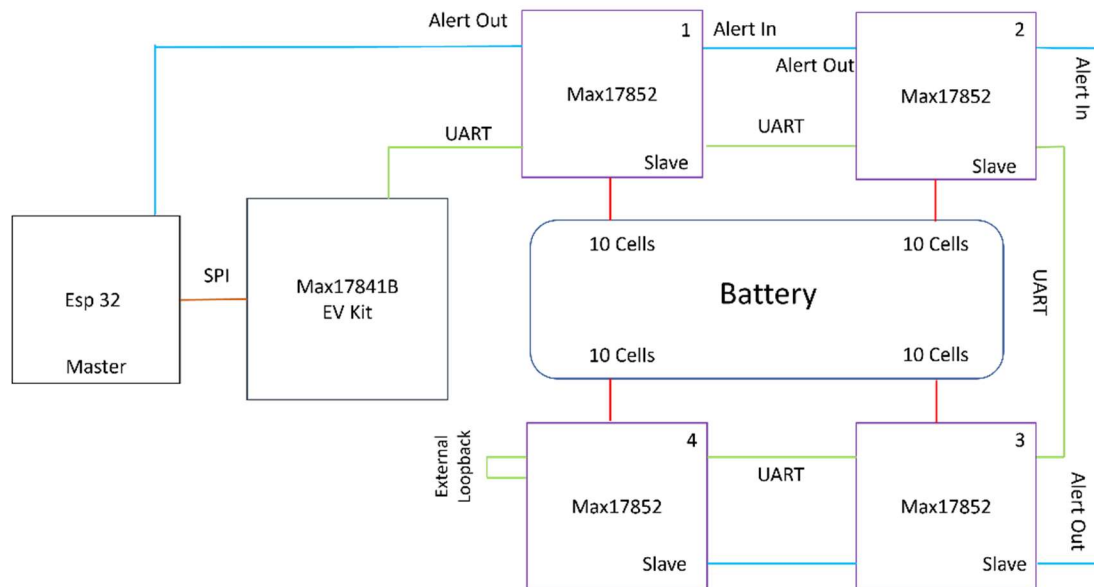


Figura 4.6 – Diagrama de Blocos do BMS desenvolvido, esquema Single UART com *loopback* externo.

O recetor UART permite tolerar condições de compatibilidade eletromagnética, EMC, adversas ((Integrated, 2020b) pág. 132). O MAX17852 é um sistema de aquisição de dados de alta tensão, que apresenta um nível de integridade de segurança, Automotive Safety Integrity Level D, ASIL D, com 14 canais de medição de tensão e um amplificador integrado para medição da corrente do pack.

Na Figura 4.7, é possível visualizar um circuito/esquema funcional do CI Max17841B. Este circuito integrado é responsável por fazer a interface entre um modulo Mestre que usa o protocolo SPI (em *half-duplex*), que pode utilizar, como no exemplo deste trabalho, um microcontrolador ESP32 ou outro, com os módulos escravos ligados em cadeia com o *Battery-Management* UART. Esta interface é específica para comunicação série síncrona normalmente utilizada para curta distância, para ler e escrever os registos ASCI (*Automotive SPI Communication Interface*) e os *buffers* usados na comunicação UART até 4MHz.

As transações de mensagens entre o módulo Mestre e o Max17841B são iniciadas quando o Mestre coloca o *Chip-Select* (CS) a Zero. Os pinos de ligação usados são o pino J1-5 e o pino GPIO n.º 34. O bit mais significativo (MSB) é o primeiro a ser transmitido para os registos ASCII. O sinal de clock (SCLK) é conectado entre o pino J1-8 e o pino GPIO n.º 36 do ESP32 e é gerado através do Mestre ESP (32) (Arduino, 2022).

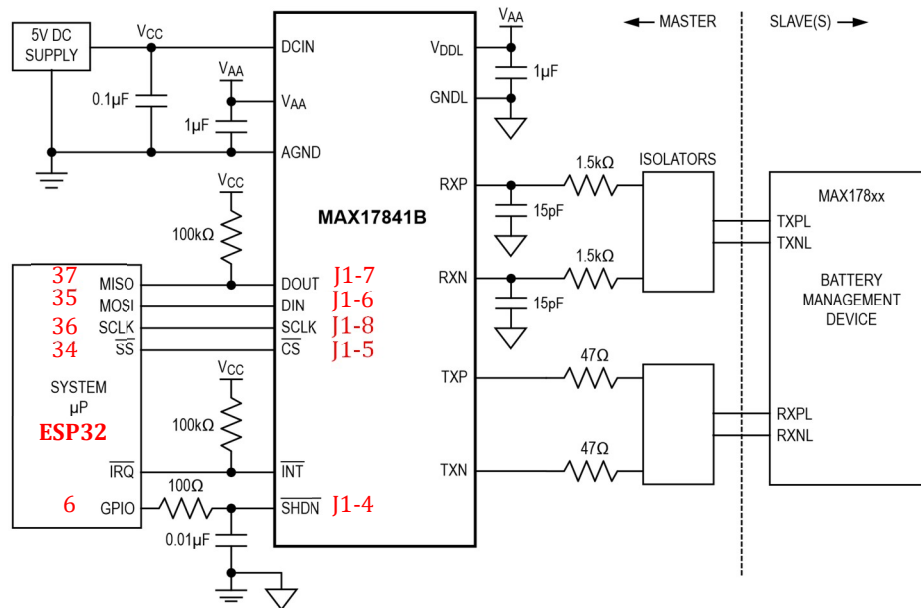


Figura 4.7 – Circuito de operação simplificado Max17841B, adaptado de (Integrated, 2018).

De seguida é indicada a configuração e os pinos utilizados no ESP32 para comunicação dos dados em SPI.

```
#define BAUDRATE          115200 // Baud rate for Serial UART communication PC to
Microcontroller
#define SPI_FREQUENCY      400000 //SPI frequency
#define SS1                34 //Slave Select in microcontroller for ESP32 use 34
#define SHDNL_MAX17841_1  6 //Shut down pin for MAX17841_1
```

4.4 Desenvolvimento do Esquemático e PCB do novo BMS

Definida a estrutura do BMS, foi desenvolvido o esquemático, como pode ser visto na Figura 4.8 e nos Anexos I e J, nas páginas 81 e 82. O software Eagle, da Autodesk (Autodesk Inc., 2022), foi utilizado para desenvolver o esquemático e o *layout* (localização física dos componentes instalados na placa) das placas PCB, com base no Kit Max17852 EV.

Durante a construção do *layout* da PCB, deve-se ter em conta vários aspetos, por exemplo, o *package* (*encapsulamento*) adequado dos componentes e a intensidade da corrente que os percorre, de forma a ajustar a largura das pistas que os interligam (Suppanz, 2018). É necessário considerar a posição dos componentes, uma vez que a distância entre eles pode afetar a qualidade da placa e causar ruídos ou interferências no sistema.

O passo seguinte deste processo, foi distribuir os componentes na PCB. Conforme já mencionado, a interface de energia foi separada da interface de comunicação.

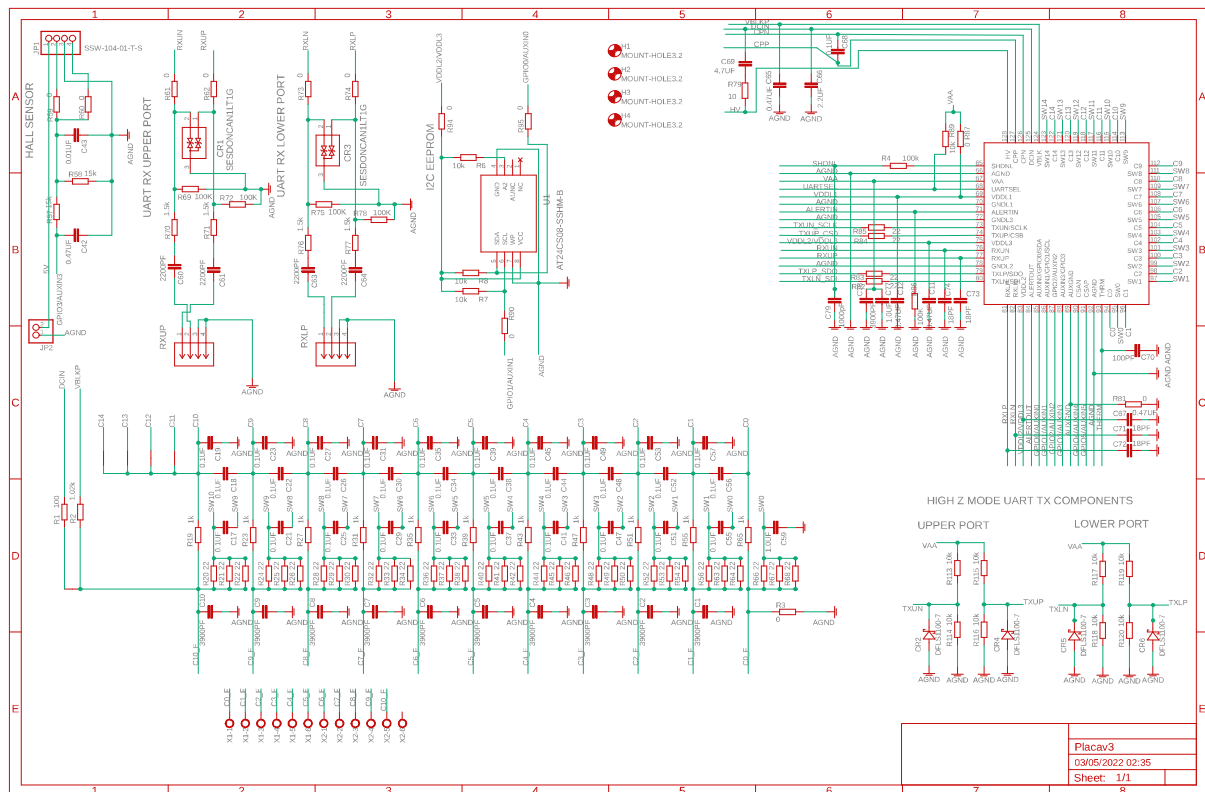


Figura 4.8 – Esquemático da PCB de um módulo escravo (Autodesk Inc., 2022).

Todo o processo de esquemático foi desenvolvido de modo a evitar conflitos com a configuração dos pines do MAX17852. Esta configuração pode ser visualizada na Figura 4.9.

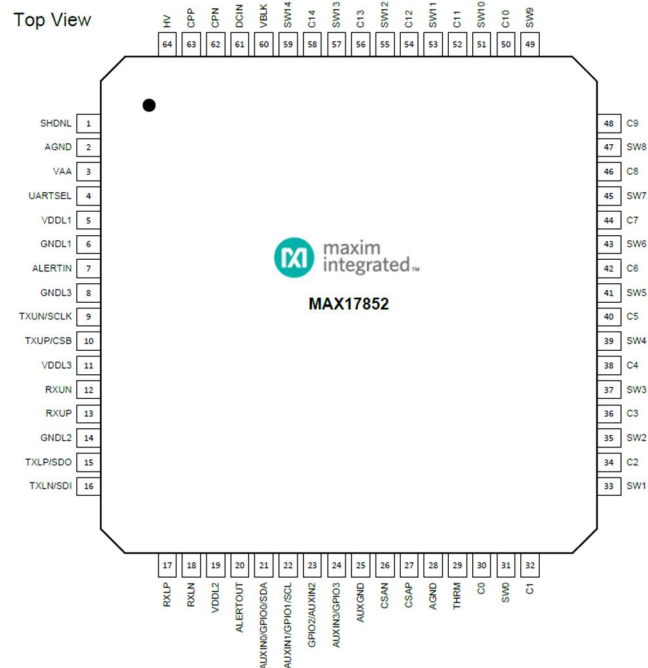


Figura 4.9 – Configuração pines MAX17852 ((Integrated, 2020b) pág. 35).

Top Layer PCB



Property		
Board		
Area	9603.00mm ²	14.88in ²
Area (Bounding Box)	9603.00mm ²	14.88in ²
Width	99.00mm	3.898in
Height	97.00mm	3.819in
▼ Stackup		
Copper Layers	2	
Board Thickness	1.57mm	0.062in
▼ Components		
Components on Top Layer	94	
Components on Bottom Layer	126	
SMD Components on Top Layer	86	
SMD Components on Bottom Layer	126	
PTH Components on Top Layer	4	
PTH Components on Bottom Layer	0	
Component Density Top Layer	0.98cm ⁻²	6.32in ⁻²
Component Density Bottom Layer	1.31cm ⁻²	8.47in ⁻²
▼ Pads		
SMD Pads Top	198	
SMD Pads Bottom	320	
SMD Pad Density Top	2.06cm ⁻²	13.30in ⁻²
SMD Pad Density Bottom	3.33cm ⁻²	21.50in ⁻²
► Drills		
► Routing		
☒ Live Update		
Close		

Figura 4.11 – Propriedades da PCB (Autodesk Inc., 2022).

O Max17852 foi colocado na camada inferior junto com a interface da bateria, conforme ilustrado na Figura 4.12 e pode ser visualizado com maior pormenor no Anexo K, na página 83.

A camada inferior contém a interface da bateria que inclui como componentes principais a ficha de conexão da bateria e as resistências de balanceamento montadas em conjuntos de três resistências de 22 Ω (package 1210) montadas em paralelo. Ao balancear uma célula, dois destes conjuntos são utilizados, realizando balanceamento passivo, por *Shunt* Resistivo com Comutação. A estrutura de hardware usada para balanceamento é detalhada em ((Integrated, 2020b) pág. 204).

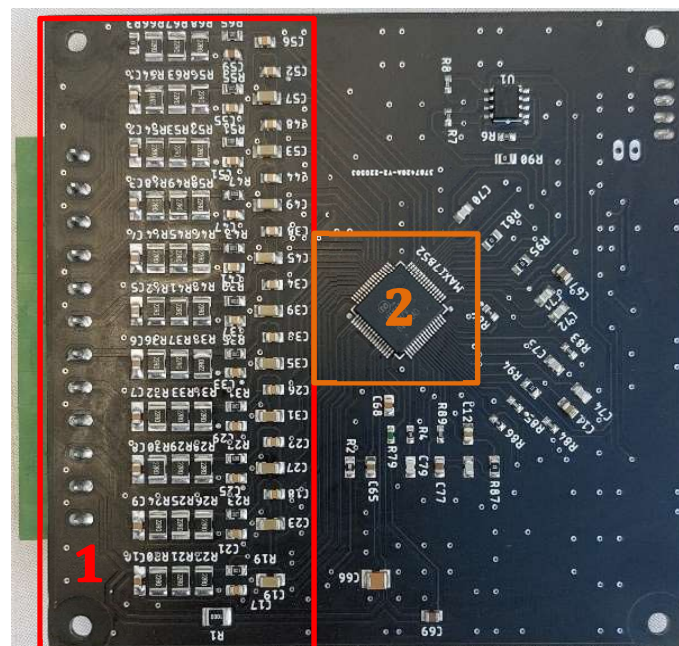


Figura 4.12 – Bottom Layer PCB: 1-Battery Pack Interface, 2-Max17852IC.

Na camada superior, a UART *Upper Port* (UP), UART *Lower Port* (LP), portas auxiliares e os alarmes de entrada e saída são colocados conforme identificado na Figura 4.13 e pode ser visualizado com maior pormenor no Anexo L, na página 84.

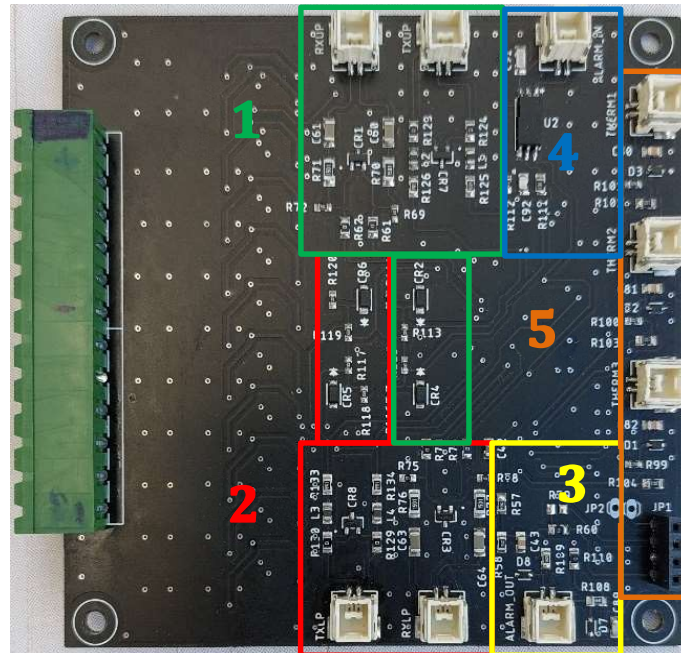


Figura 4.13 - *Top Layer* PCB: 1-UART UP, 2-UART LP, 3-Alert Out LP, 4-Alert In UP, 5-Aux Input, Aux Output, Current Sensor Amplifier interface (CSA, em JP1).

A *Top Layer* (face de cima da placa quando instalada) contém os componentes para as seguintes funcionalidades:

- Os pinos auxiliares (*Aux Input* e *Aux Output*) fornecem interfaces diretas para interligar sondas NTC de temperatura. Esta ligação é feita por sensores NTC de 10 k Ω , conectados ao pino THRM e cada placa PCB permite a conexão de 3 sondas.
- As entradas CSAP e CSAN (Integrated, 2020b) MAX17852 são conectadas aos pinos Auxin 4 e Auxin 5 que permitem medir com precisão a tensão diferencial de uma resistência shunt, possibilitando medir a corrente da bateria.
- Alert Out e Alert In executam alertas através de condição de falha, verificar funcionamento no Anexo B, página 74. Este sistema permite comunicar falhas críticas de segurança, sejam elas: medições de tensão, medições de temperatura, falhas de comunicação de interface, calibração e outros diagnósticos de hardware (Integrated, 2020b).
- As portas de comunicação UART LP e UART UP do Max17852, na PCB, são identificadas como as portas de comunicação superiores (RXUP/TXUP) e as portas de comunicação inferiores (RXLP/TXLP). Cada porta UART inclui um transmissor e um recetor diferencial. Os dados de comunicação recebidos no recetor inferior (RXL) são retransmitidos através do transmissor superior (TXU) para a próxima placa PCB em cadeia. A comunicação recebida no recetor superior (RXU) é retransmitida através do

transmissor inferior (TXL) e percorre todas as PCBs em retorno até ao Max17841B EV Kit.

A construção das placas PCB teve como objetivo monitorizar as 40 células da bateria LiFePO₄. Por consequência, foram desenvolvidas 4 placas PCB, pois cada placa permite monitorizar 10 células. No futuro, será desenvolvido outra placa PCB para suportar o microcontrolador ESP32, que incluirá o Max17841B, de forma a remover o Max17841 EV KIT usado apenas para desenvolvimento. Na Figura 4.14 é possível visualizar a montagem das 4 placas, após realização da soldadura dos componentes SMD, através de uma estação de ar quente, no laboratório de Projetos de Automação do ISEC.

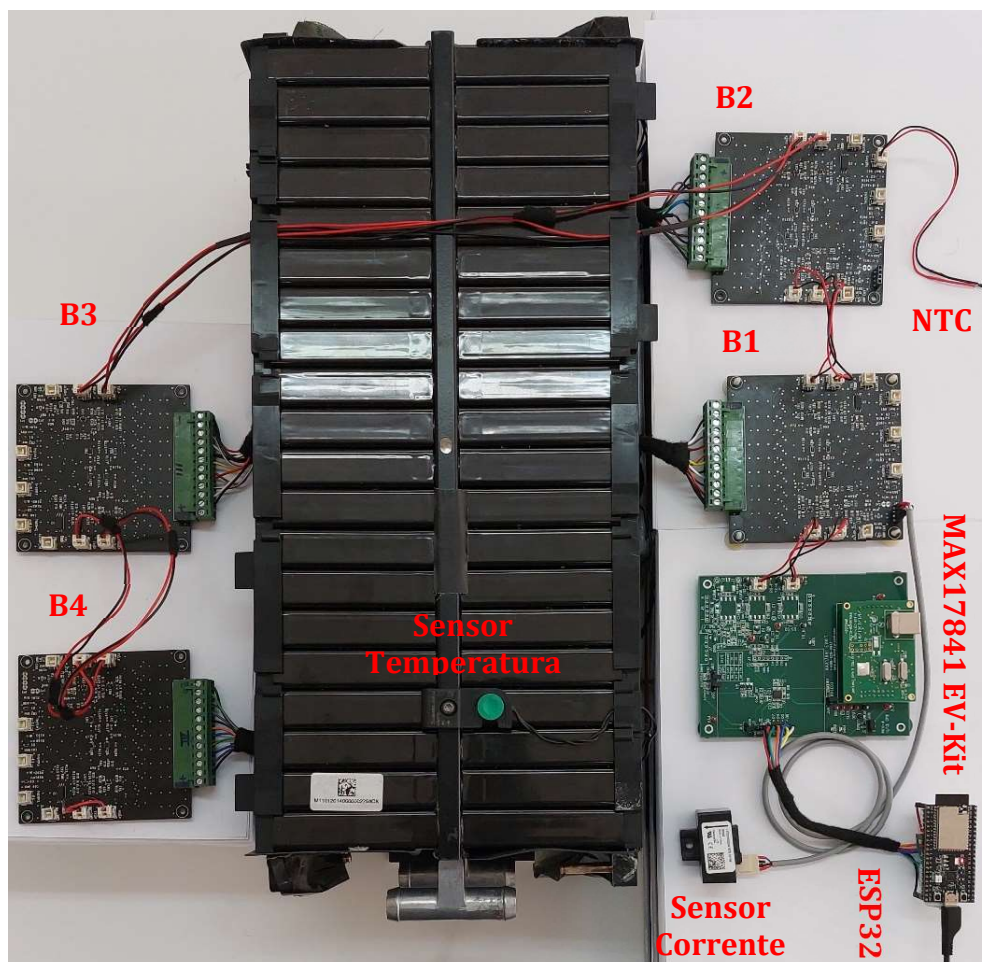


Figura 4.14 - Quatro placas BMS, em teste após montagem.

Os quatro sensores de temperatura aplicados na bateria, NTC de 10 k Ω , permitem monitorizar a temperatura, estando aplicados conforme a Figura 4.15. Utilizaram-se os suportes já existentes para aplicar os novos sensores.

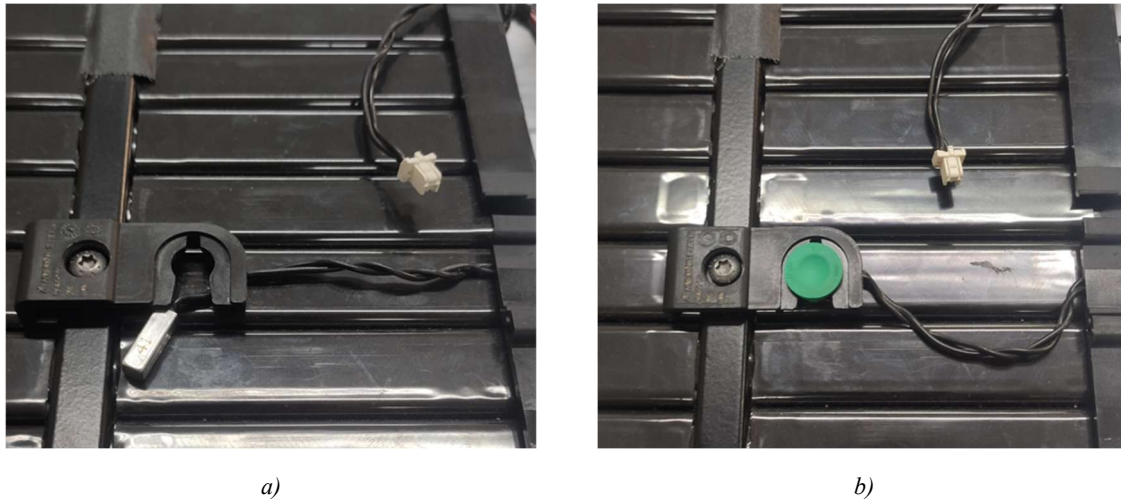


Figura 4.15 – Sensor de temperatura, NTC 10 k Ω

O sensor de corrente, Figura 4.16 a), L37S200S05M-ND, permite a leitura de corrente entre -200A e +200A, mas a tensão de funcionamento é 5V DC. Visto que nas PCBs e no microcontrolador não existe possibilidade de fornecer 5V regulados, como solução, aplicou-se um conversor DC-DC de 3,3V – 5V (Figura 4.16 c), MEF1S0305SP3C) e criou-se um filtro, Figura 4.16 b), garantindo que a alimentação é regulada a 5V e permite a correta leitura do valor da corrente da bateria.

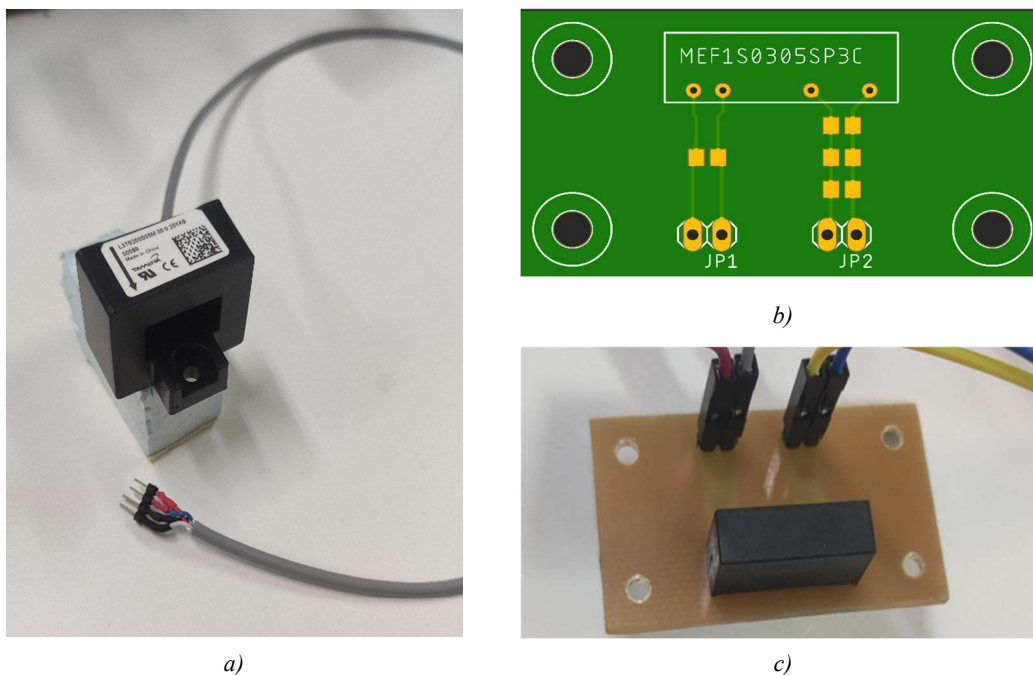


Figura 4.16 – a) Sensor de Corrente; b) *Layout* da placa para o conversor DC-DC; c) Placa com conversor DC-DC.

Na Figura 4.17 são descritas as fases fundamentais do processo para a realização do projeto.

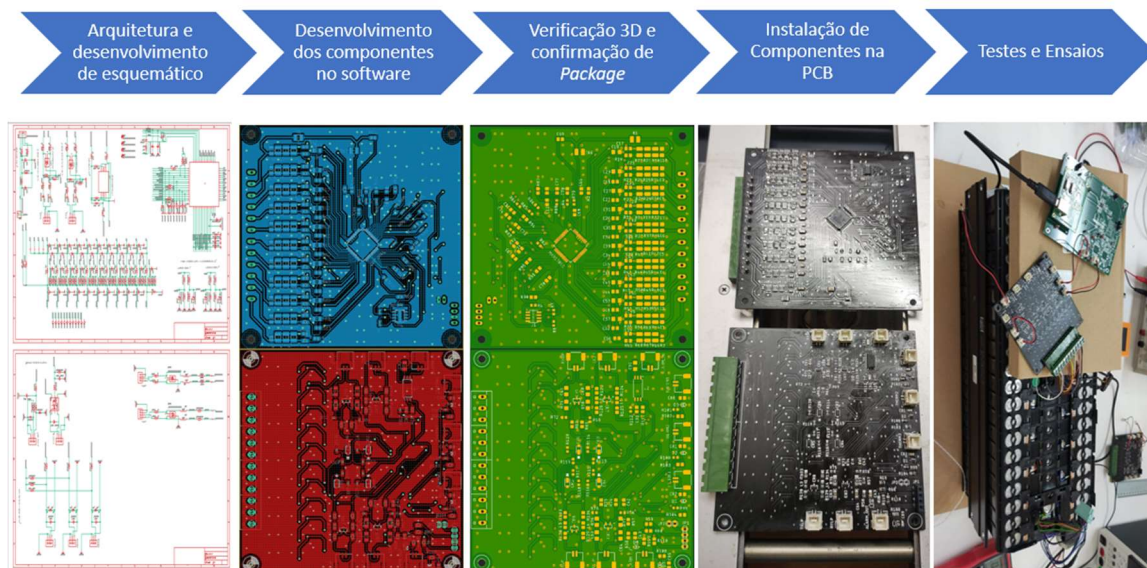


Figura 4.17 - Processos desenvolvidos durante o projeto

Como mencionado anteriormente, há muitos aspetos a serem considerados ao projetar uma placa de circuito impresso. O comprimento e a largura das pistas são muito importantes na realização do *layout*, considerando a tensão e a corrente aplicadas. As pistas podem estar em camadas internas ou externas, mas, neste caso, existem apenas pistas nas camadas externas. O facto de haver apenas pistas nas camadas externas permite que elas tenham larguras menores do que nas camadas internas, devido à mais fácil dissipação de calor. Na área de interface da bateria (Figura 4.12), foi considerada uma corrente de aproximadamente 1A (as correntes de balanceamento são menores que 350 mA), portanto para balanceamento foi selecionada uma largura de pista de 0,508 mm, e na placa restante, para controlo/comunicações foi considerado 0,254 mm. Todos os cálculos foram realizados para ter um aumento da temperatura da pista abaixo de 5°C com temperatura ambiente de 25°C. O tamanho da placa PCB é 99x97x1,6 (mm). Existem ferramentas online que são de grande importância para avaliar rapidamente a largura de pista adequada a ser usada, em relação ao aumento de temperatura e espessura da pista (Suppanz, 2018).

Após todos os PCBs estarem conectados em série, estes devem ser conectados ao VCU (*Vehicle Control Unit*). Para realizar a gestão na conexão do BMS com o VE, o microcontrolador ESP32 está a ser usado para implementar o protocolo de interface de código aberto. Uma vantagem deste microcontrolador é que este oferece conectividade Bluetooth e Wi-Fi. Isto permite, por exemplo, criar uma APP de gestão Android BMS.

As PCBs com o integrado Max1752, usam o protocolo UART e são ligadas em cadeia; o ESP32 conecta-se com o Max1741B através de SPI como um transmissor-recetor. As placas BMS interligadas em série, estão ligadas ao MAX1741B EV KIT (Integrated, 2018). É possível através de uma aplicação de Windows PC obter leituras e realizar balanceamento, por exemplo, usando o Software Kit de Avaliação Max1753 (Maxim Integrated, 2021).

Para maior segurança, a UART MAX17852 possui codificação Manchester, e optou-se pela aquisição do MAX17841B EV KIT (Integrated, 2018) para realizar a interface de decodificação entre o microcontrolador ESP32 (Integrated, 2020b). O Max17852 permite dois tipos de protocolos de comunicação para controlar a aquisição de dados. Estes podem ser o protocolo UART ou SPI, dependendo das configurações de *hardware*, mas não podem ser alterados dinamicamente, o pino UARTSEL (Integrated, 2020b) permite a configuração desta interface.

4.5 Balanceamento das Células

O balanceamento de células é realizado através do modo passivo, este é executado através da combinação de 10 interruptores (MOSFET) de balanceamento de células internas. Para isso, é necessário configurar os parâmetros em BALSWEEN, no registo BALSWECTRL, Figura 4.18.

BIT	15	14	13	12	11	10	9	8
Field	CBRESTART	–	BALSWEEN[14:9]					
Reset	0b0	–	0x0000					
Access Type	Write, Read, Pulse	–	Write, Read, Ext					
BIT	7	6	5	4	3	2	1	0
Field	BALSWEEN[8:1]							
Reset	0x0000							
Access Type	Write, Read, Ext							

Figura 4.18 – Registo BALSWECTRL (0X6F) ((Integrated, 2020b) pág. 310).

Deste modo, permite a realização de balanceamento nas 10 células ligadas em cada PCB. A configuração CBRESTART, é apenas usada em modo manual e foi colocada a 0b0. A configuração usada do registo BALSWECTRL, conforme excerto de código abaixo, sendo realizado consoante os valores de tensão das células, verifica-se qual o valor mínimo de tensão das células, confirmando-se quantas células têm o valor mínimo e estas ficam desabilitadas para balanceamento. O valor obtido de ActivCell é enviado para BALSWEEN e deste modo apenas é realizado o balanceamento das células necessárias, deste modo, otimiza-se energia da bateria.

```

for (int i=1; i < (10+numDevice*10); i++){
    if(cellsVoltage[i]>cellsVoltage[posmax]){
        posmax=i;
    }
    else if(cellsVoltage[i]<cellsVoltage[posmin]){
        posmin=i;
    }
}
for(int i = 0; i < (10+numDevice*10); i++) {
    if(cellsVoltage[i] == cellsVoltage[posmin])
        minPositions[i]=0;
    else
        minPositions[i]=1;
}

```

```

Serial.print("minPositions: ");
Serial.print(minPositions[i]);
}
ActivCell[0] = 0;
ActivCell[1] = 0;
ActivCell[2] = 0;
ActivCell[3] = 0;

for(int i=0; i<numDevice+1; i++){
    for(int j=9; j>-1; j--){
        ActivCell[i] = ActivCell[i] << 1;
        ActivCell[i] = ActivCell[i] + minPositions[j];
    }
}
    
```

No registo BALCTRL, será permitido realizar o balanceamento das células de acordo com o modo de operação configurado, permitindo o balanceamento manual ou automático, o controlo de descarga através de um temporizador e/ou o limite de subtensão, bem como a configuração dos ciclos de trabalho.

Na Tabela 4.3 é possível verificar os modos de balanceamento disponíveis pelo MAX17852, bem como a configuração dos bits.

Tabela 4.3 – Modos de balanceamento de células ((Integrated, 2020b) pág. 111).

CBMODE[2:0]	DESCRIPTION	CBEXPn[9:0]	TIMER RESOLUTION	TCBEO	RRANGE OF CBEXPn[9:0]	
					MINIMUM	MAXIMUM
000b	Cell Balancing Disabled	000h	-	-	-	
001b	Emergency/EOL Discharge by Hour	001h - 3FFh	1 hr	0.5 min	1 hr	1022 hr
010b	Manual Cell Balancing by Second	001h - 3FFh	1 s		1 s	1022 s
011b	Manual Cell Balancing by Minute	001h - 3FFh	1 min		1 min	1022 min
100b	Auto Individual Cell Balancing by Second	001h - 3FFh	1 s	0.5 s	1 s	1022 s
101b	Auto Individual Cell Balancing by Minute	001h - 3FFh	1 min	0.5 min	1 min	1022 min
110b	Auto Group Cell Balancing by Second	001h - 3FFh	1 s	0.5 s	1 s	1022 s
111b	Auto Group Cell Balancing by Minute	001h - 3FFh	1 min	0.5 min	1 min	1022 min

Os modos de balanceamento acima indicados estão configurados internamente no circuito integrado, mas, de qualquer das formas, estes modos de balanceamento são bastante versáteis.

No balanceamento, existem vários aspetos que não podem ser descartados, por exemplo, a tensão mínima de limite de balanceamento, *UV Detection*, que é configurado através de CBUVTHR, no registo BALAUTOUVTHR, podendo ser verificada a configuração implementada no excerto de código abaixo. O tempo de balanceamento é controlado pelo registo CBEXP1, e é verificado em CBTIMER, no registo BALSTAT, este tempo pode ser

analisado em segundos ou minutos, quando CBTIMER = CBEXP1 o tempo de balanceamento fica concluído.

```
//BALAUTOVTHR (0X7E)
#define CBUVTHR      0b10100100101000
#define CBUVMINCELL 0b1
```

O balanceamento de células por limite *Under-Voltage* (valor baixo de tensão), UV, permite que todas as células que estão configuradas em BALSWEN sejam controladas individualmente para um nível de tensão específico e uniforme, conforme é possível verificar na Figura 4.19. Quando todas as células atingirem o limite de UV, todos os interruptores de balanceamento de células serão desativados, mas o temporizador de balanceamento de células continuará em funcionamento até à conclusão. Conforme indicado acima, CBUVTHR é o valor limite UV, para todas as células e CBEXP1, no registo BALEXP1, é o tempo de expiração de balanceamento de célula, no modo de balanceamento de células de grupo automáticas (CBMODE = 0b11x). Nestes parâmetros ambas as situações podem provocar a interrupção do balanceamento, neste caso por atingir o valor UV ou por chegar ao limite de tempo.

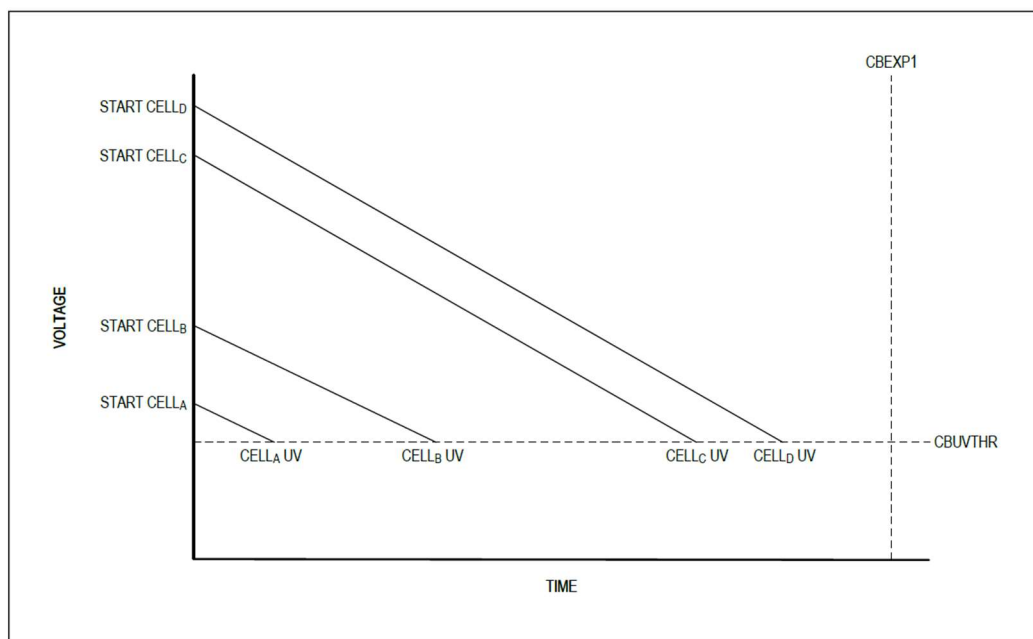


Figura 4.19 – Limite UV do balanceamento das células ((Integrated, 2020b) pág. 116).

O balanceamento automático de células com configuração CBUVTHR, só é compatível com medições de células unipolares com BALSWEN [N] = 0b1. Também deve estar garantido CELLEN [N] = 0b1 e POLARITY [N] = 0b0 para permitir as atualizações de medição necessárias (Integrated, 2020b).

O balanceamento automático de células para um limite de UV é configurado definindo os bits CBMEASEN, no registo BALCTRL para 0b11. Se o temporizador estiver programado, servirá como mecanismo redundante para garantir que nenhuma célula não descarrega em excesso.

O temporizador CBTIMER, disponível no registo BALSTAT, nos modos Manual, Descarga de emergência e Grupo automático, conta até atingir a duração definida em CBEXP1. Quando é solicitado indica o tempo em que cada ciclo (par e ímpar) está sujeito a descarga, isto é, no mínimo o tempo real será 2x maior que o tempo definido em CBEXP1. Dependerá do CBDUTY se este estiver a 100% o valor será 2x maior que o tempo de CBEXP1, caso esteja a 50% demorará 4x o valor indicado. Quando o temporizador de balanceamento de célula termina, todos os interruptores de balanceamento de célula são desativados.

Quando CBEXP1 é diferente de zero, o temporizador de balanceamento de célula, CBTIMER, será executado e qualquer medição e operação de calibração solicitadas serão realizadas até à expiração, o que garante que o μC ainda possa aceder o dispositivo para confirmar o progresso da operação de balanceamento e o status de saída.

Um valor de CBEXP1[9-0] = 0x000 garante que nenhum balanceamento de célula ocorra. Por questões de segurança, todos os BALEXPn são padronizados para 0x000, para garantir que nenhum balanceamento de célula é realizado sem configuração prévia.

As medições durante o balanceamento de células só ocorrem quando ativado CBMEASEN, no registo CBMEASEN, através de 2 bits de configuração, Figura 4.20. Estas medições são realizadas utilizando o ADC com OVSAMPL=16x e SCANMODE = ‘pirâmide’ de forma a realizar medições com maior precisão. Durante o balanceamento qualquer tentativa de sobrescrever parâmetros será ignorada e enviado um alarme de ALRTRJCT.

BIT	15	14	13	12	11	10	9	8
Field	CBACTIVE[1:0]		CBMODE[2:0]			CBIIRINIT	HOLDSDNL[1:0]	
Reset	0b00		0b000			0b0	0b00	
Access Type	Read Only		Write, Read, Ext			Write, Read	Write, Read	
BIT	7	6	5	4	3	2	1	0
Field	CBDUTY[3:0]				CBDONEAL RTEN	CBTEMPE N	CBMEASEN[1:0]	
Reset	0x0				0b0	0b0	0x0	
Access Type	Write, Read				Write, Read	Write, Read	Write, Read	

Figura 4.20 – Registo BALCTRL (0X80) ((Integrated, 2020b) pág. 320).

Para medições mais precisas e com imunidade a ruídos de forma a manter um elevado desempenho durante o balanceamento, o MAX17852 permite ativar as medições de ADC com um filtro IIR em cada célula individual. Para que este seja habilitado é necessário colocar o CBIIRINIT =1, no registo BALCTRL, conforme é possível visualizar na Figura 4.20 (Integrated, 2020b). No excerto de código abaixo, é possível visualizar a configuração realizada na programação do registo BALCTRL.

```
//BALCTRL (0X80)
#define CBACTIVE          0b00
#define CBMODE            0b100
#define CBIIRINIT         0b1
#define HOLDSDNL          0b01
```

```
#define CBDUTY          0b1011
#define CBDONEALRTEN 0b1
#define CBTEMPEN       0b1
#define CBMEASEN       0b11
```

Durante o processo de balanceamento é o registo BALSTAT, Figura 4.21, que contém parâmetros que permitem devolver informação sobre o processo realizado. Neste caso, o CBACTIVE_M1 informa sobre estado de balanceamento, se está desativado, em balanceamento ou concluído. O tempo decorrido de balanceamento através do CBTIMER, conforme já indicado acima, e o CBUNIT notifica sobre as unidades utilizadas no contador do CBTIMER, segundos, minutos ou horas.

BIT	15	14	13	12	11	10	9	8
Field	CBACTIVE_M1[1:0]		CBUNIT[1:0]		CBCNTR[1:0]		CBTIMER[9:8]	
Reset	0b00		0b00		0b00		0x000	
Access Type	Read Only		Read Only		Read Only		Read Only	
BIT	7	6	5	4	3	2	1	0
Field	CBTIMER[7:0]							
Reset	0x000							
Access Type	Read Only							

Figura 4.21 – Registo BALSTAT (0X81) ((Integrated, 2020b) pág. 322).

De seguida são apresentados os testes e ensaios realizados no decorrer do projeto.

5 TESTES E ENSAIOS

Durante a montagem dos componentes é necessário confirmar o correto funcionamento das placas, verificar soldaduras, realizar medições, fazer testes de comunicações e por fim testar o funcionamento do balanceamento, tendo sido todos estes procedimentos realizados no Laboratório de Projetos do ISEC. Na Figura 5.1, é possível verificar que algumas resistências não ficaram soldadas corretamente, sendo esta confirmação realizada através de microscópio digital ou por medição com o multímetro.

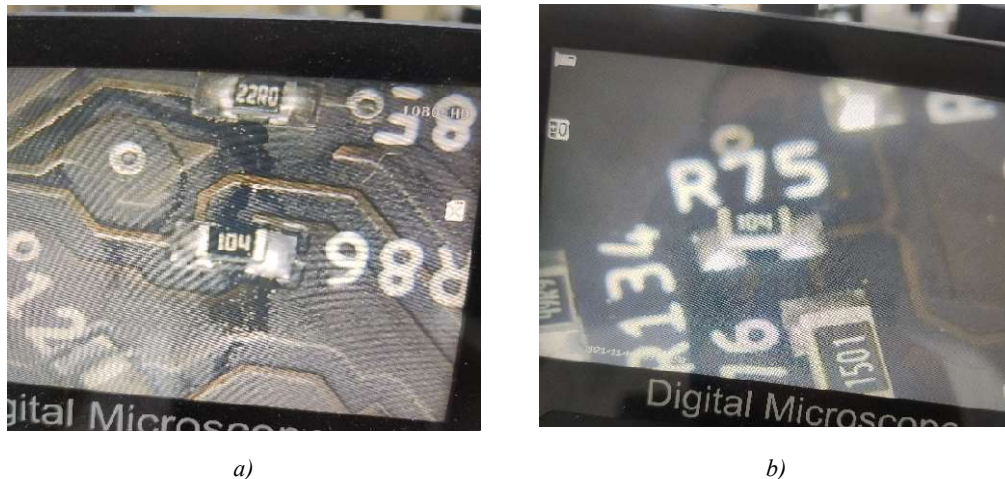


Figura 5.1 – Verificação de soldaduras nas placas PCB: soldaduras deficientes.

Inicialmente, para se realizarem todos os testes com segurança, principalmente para confirmar o normal funcionamento das placas BMS após a montagem, os testes foram realizados sem bateria. Neste caso, foram instaladas dez resistências de 2 k Ω em série, para criar um divisor de tensão, de modo a substituir uma bateria, com o uso de uma fonte de alimentação. Para aplicar as tensões equivalentes, foram instaladas resistências entre os terminais de entrada das células C0 a C10, que por sua vez permitem a leitura da medição de tensão do Max17852 (Integrated, 2020b). Na Figura 5.2, está a ser realizado um teste de funcionamento da placa PCB, com o auxílio do software Max17853 Evaluation Kit.

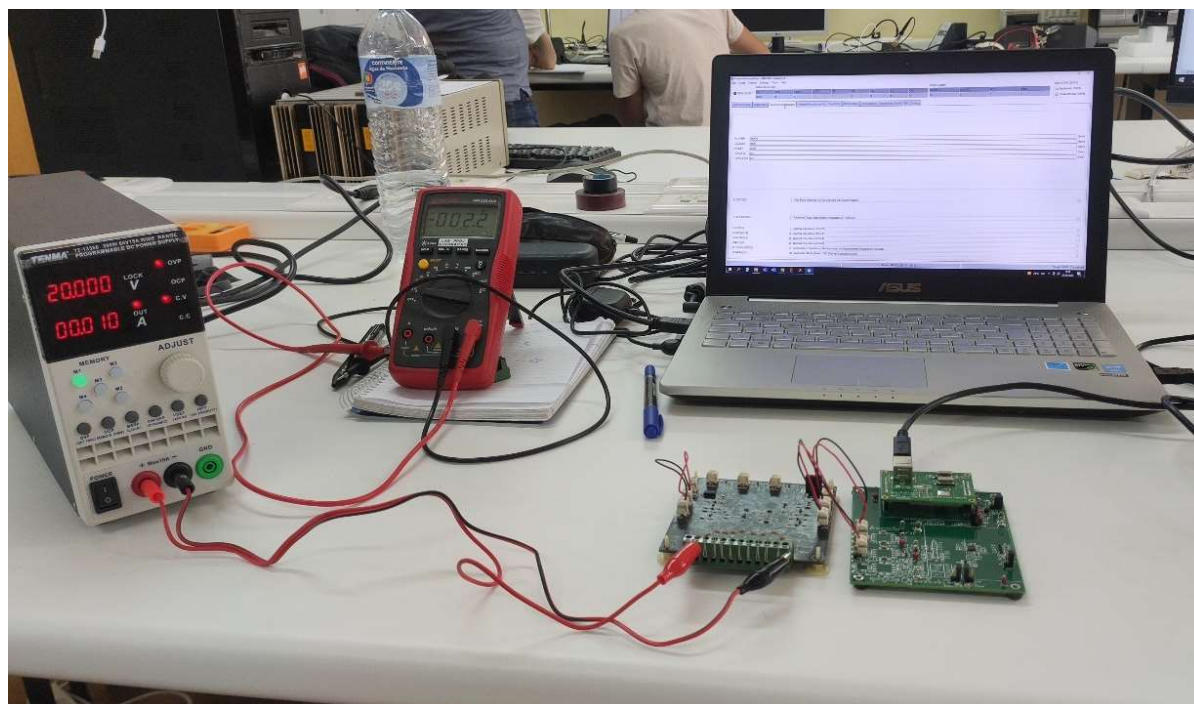


Figura 5.2 – Teste de funcionamento da placa PCB.

A aquisição de dados é realizada em modo pirâmide, sendo primeiro verificadas as leituras dos valores de tensão das células e de seguida os valores das portas auxiliares, consoante as necessidades do utilizador, segundo a Figura 5.3 (resultados na Figura 5.4 e Tabela 5.1).

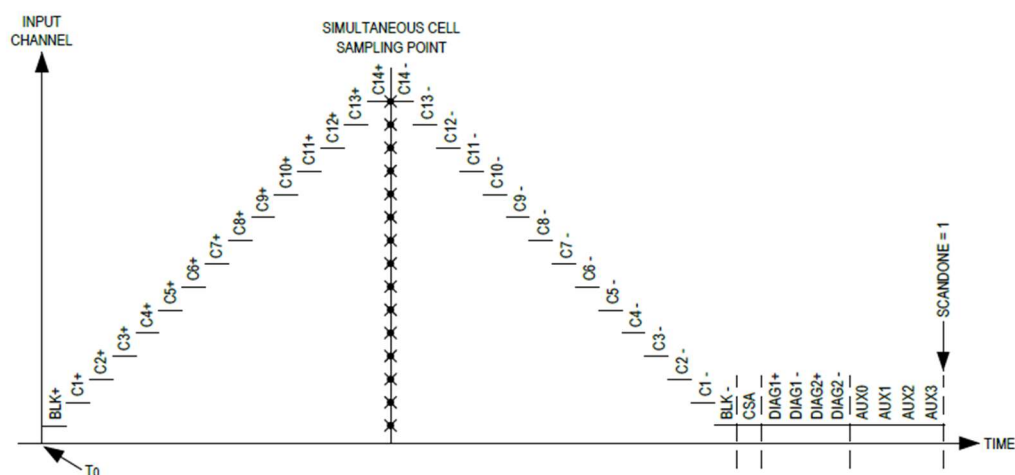


Figura 5.3 – Aquisição de dados ADC em sequência, modo pirâmide (Integrated, 2020b).

Assim, foram realizados testes de comunicação e leitura de células. Inicialmente, as leituras obtidas foram realizadas pelo software Max17853 Evaluation Kit, da Maxim Integrated (Integrated, 2018, 2020a; Maxim Integrated, 2021). A Figura 5.4 representa testes realizados em tempo real, obtendo os valores de tensão das 40 células. Aux In 2 (designado AIN2 na Figura 5.4) mostra o valor da temperatura de quatro sensores NTC (um em cada placa),

dimensionada em volts, necessitando de realizar conversão para graus Celsius. Neste ensaio também é possível verificar o valor da tensão total do grupo de cada placa.

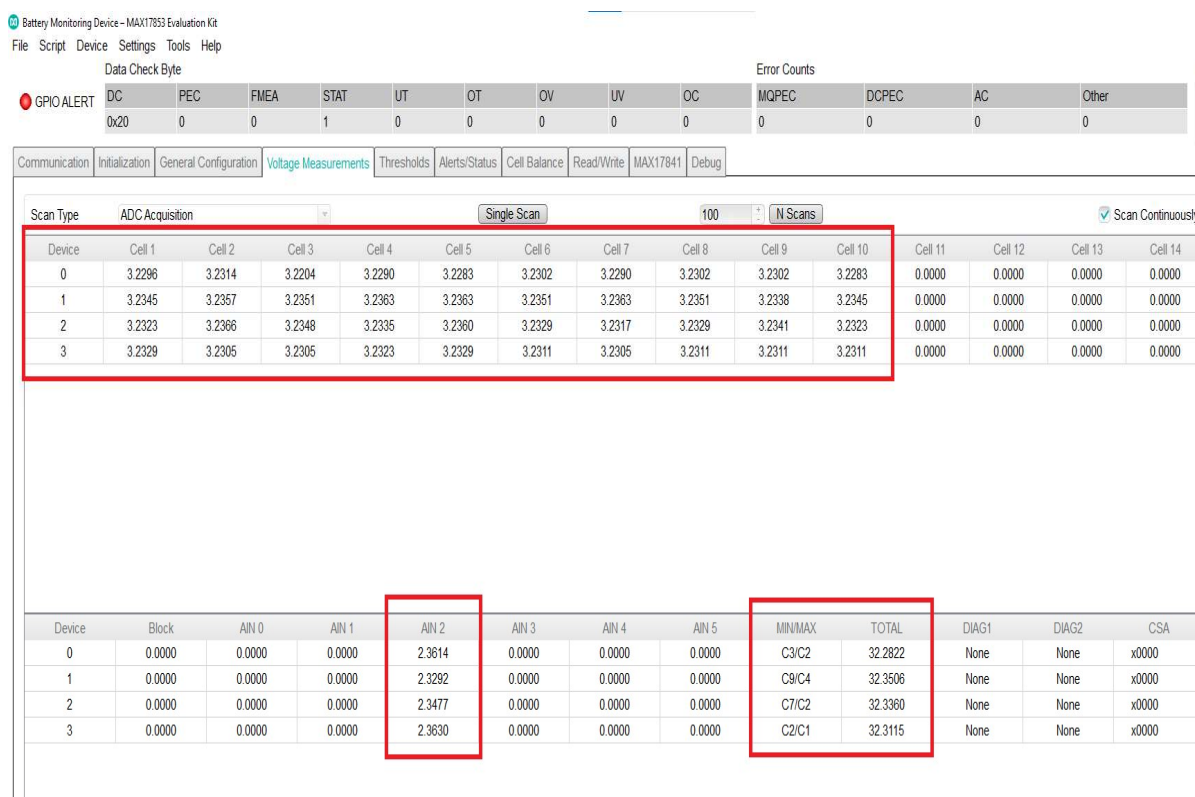


Figura 5.4 – Leitura em tempo real das 40 células de bateria através do software Max17853 EV Kit.

Com a evolução dos testes, foi testada a aquisição de valores de células, valores de temperatura e alarmes de baixa e alta tensão. Em seguida, foi utilizado o ESP32 com programação em C, obtendo também os parâmetros discutidos acima. Para melhor perceção das parametrizações e dos passos realizados para a monitorização com o ESP32, pode-se visualizar o fluxograma da Figura 5.5 e verificar a descrição das funções nas páginas 53 e 54.

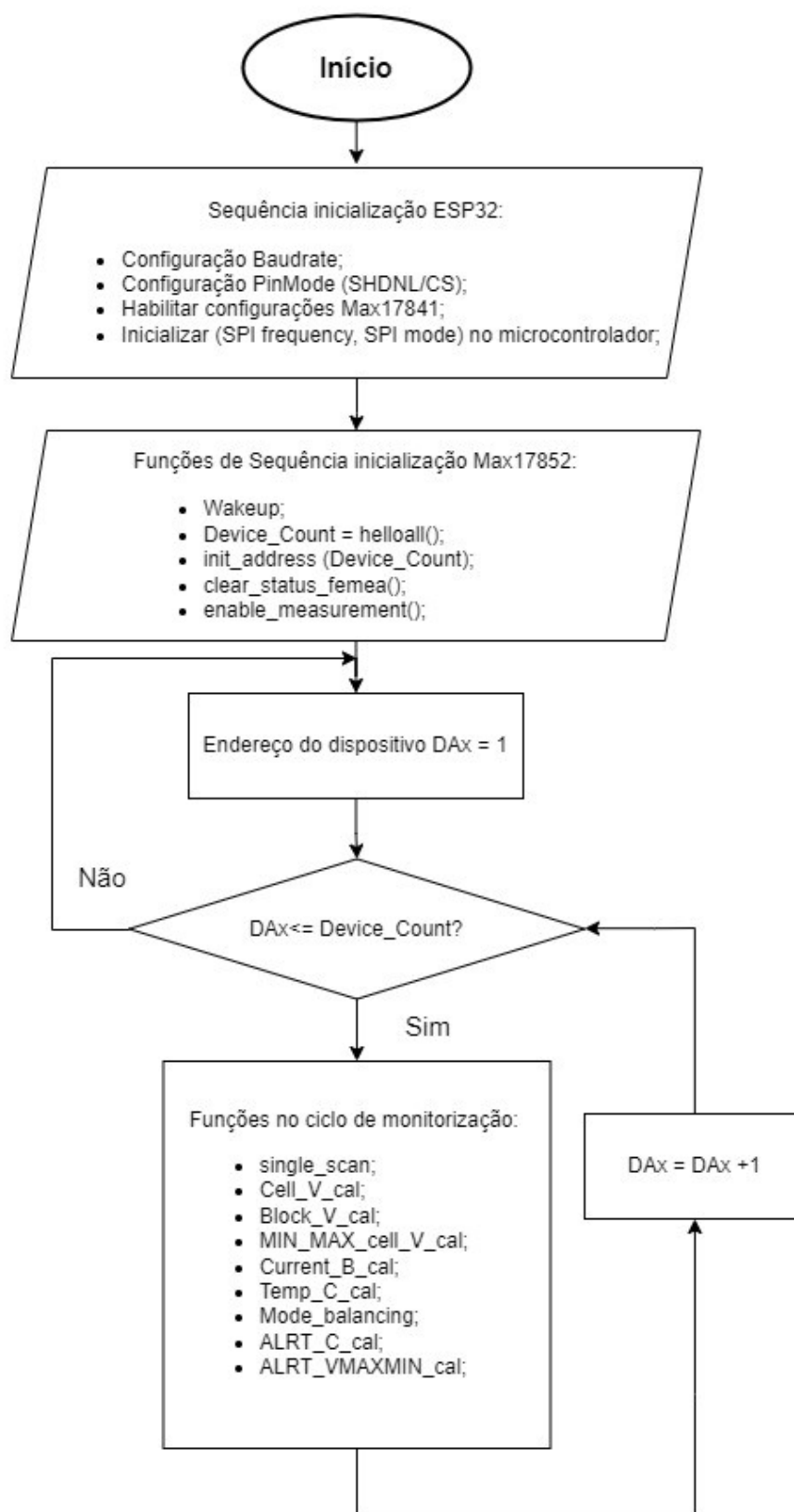


Figura 5.5 – Fluxograma ciclo de medições e monitorização.

O primeiro passo do programa em C, passou por configurar a inicialização do ESP32, Figura 5.5. Estes parâmetros são necessários para realizar a comunicação entre o microcontrolador e o Max17841B EV Kit. Deste modo, cria-se a ponte para o passo seguinte, criar funções para a inicialização do Max17852. De realçar que existem funções internas do Max17852 que são necessárias, sempre que é ligado o sistema. As condições do processo de “Sequência inicialização do ESP32” é composta pelos seguintes parâmetros *Baudrate* 115200, frequência de funcionamento do SPI 400 MHz, *Slave Select* pino nº. 34 do ESP32 e o *Shutdown* pino nº. 6 do ESP32. No processo “Funções de Sequência inicialização Max17852” a função *wakeup*, serve para inicializar o sistema e limpa o buffer de dados de transmissão e receção de dados, a função *helloall*, verifica os dispositivos ligados em cadeia e atribui os endereços aos dispositivos conforme a sua distribuição. O número de dispositivos interligados é armazenado na variável “Device_count”. De seguida, limpa os dados armazenados em FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), ou seja, Análise de Modo e Efeito de Falha.

De forma a poder realizar aquisição de dados e realizar a monitorização, nos seguintes excertos de código, podem ver-se as funções utilizadas para aquisição de dados através do ESP32, podendo-se verificar dez funções para aquisição de dados.

```
class V_measure
{
public:
    void V_measure_sequence(int Device_count);
    void single_scan(int Device_add);
    void cell_V_cal(int Device_add);
    void block_V_cal(int Device_add);
    void MIN_MAX_cell_V_cal(int Device_add);
    void Current_B_cal(int Device_add);
    void Mode_balancing(int Device_add); //
    void Temp_C_cal(int Device_add);
    void ALRT_C_cal(int Device_add);
    void ALRT_VMAXMIN_cal(int Device_add);
};
```

Na função abaixo é verificado o número de dispositivos ligados em cadeia. Se todas as condições estiverem validadas, na função “single_scan” é solicitada uma nova aquisição de dados e as restantes funções devolvem os valores associados a cada registo.

```
void V_measure::V_measure_sequence(int Device_count)
{
    for (int DAx = 0; DAx < Device_count; DAx++)
    {
        int DAx1 = DAx + 1;
        numDevice = DAx;
        Serial.print("\nMeasurements Cells Block: ");
        Serial.println(DAx1);
        Serial.println();
        ALRT_C_cal(read_add[DAx]); // Reads the voltage record and alerts cells with
        UnderVoltage and OverVoltage.
    }
}
```

```

    single_scan(write_add[DAX]); // Request new measurement sequence (scan) and
    initiate a data transfer.
    delay(500);
    cell_V_cal(read_add[DAX]); // Reads each cell register and converts the raw value
    to cell voltage.
    MIN_MAX_cell_V_cal(read_add[DAX]);
    block_V_cal(read_add[DAX]); // Reads Block voltage register and converts the raw
    value to Block voltage.
    if (DAX1 = 1) {
        Current_B_cal(read_add[DAX]); // Reads Voltage register and converts the raw
        value to current in amps.
    }
    Temp_C_cal(read_add[DAX]); // Reads Voltage register and converts the raw value
    to temperature in celsius degrees.
    ALRT_VMAXMIN_cal(read_add[DAX]); // Reads the maximum and minimum
    voltage register of the cells and indicates when it needs balancing.
    Serial.print("Conclusion Read Cells Block: ");
    Serial.println(DAX + 1);
}
}

```

No processo “Funções do ciclo de monitorização”, na Figura 5.5 cada função tem uma componente específica, de seguida será explicado o objetivo de cada função:

- Função “cell_V_cal” vai retornar o valor das dez células ligadas no dispositivo, valores de retorno ADDR_CELL1REG até ADDR_CELL10REG;
- Função “MIN_MAX_cell_V_cal” devolve as células com tensão mínima e máxima de cada dispositivo, valor de retorno ADDR_MINMAXCELL;
- Função “block_V_cal” devolve o valor global das 10 células ligadas, ADDR_BLOCKREG;
- Função “Current_B_cal” caso o dispositivo ligado seja o 1, retorna o valor de corrente que a bateria está a debitar, valor devolvido ADDR_AUX3REG;
- Função “Temp_C_cal” devolve o valor de temperatura da bateria (cada placa PCB contém, no mínimo, uma sonda NTC), valor de retorno ADDR_AUX2REG.
- Função “ALRT_C_cal” devolve a quantidade de células que estão em UV/OV num valor binário através dos registos ADDR_ALRTOVCELL e ADDR_ALRTUVCELL.
- Função “ALRT_VMAXMIN_cal” compara o valor de tensão entre a células V_{máx} e V_{min} Caso este valor seja superior a MSMTCHREG, irá indicar que as células necessitam de realizar balanceamento.

Outras configurações relevantes podem ser observadas na página 76, Anexo D. Neste anexo estão descritas a funções fundamentais para a inicialização do programa.

A Tabela 5.1 mostra os valores de tensão e temperatura obtidos após a leitura das 40 células, utilizando a configuração apresentada na Figura 4.14, sendo possível verificar através das fotos

na parte inferior da tabela a confirmação dos valores utilizando um multímetro de alta precisão da BK Precision (cerca de 1 mV de diferença).

Tabela 5.1 – Teste de aquisição de dados, através do monitor série da aplicação.

DEVICE: 1	DEVICE: 2	DEVICE: 3	DEVICE: 4
Cell 1: 3.224V	Cell 1: 3.227V	Cell 1: 3.228V	Cell 1: 3.224V
Cell 2: 3.224V	Cell 2: 3.231V	Cell 2: 3.230V	Cell 2: 3.226V
Cell 3: 3.226V	Cell 3: 3.230V	Cell 3: 3.229V	Cell 3: 3.213V
Cell 4: 3.225V	Cell 4: 3.229V	Cell 4: 3.229V	Cell 4: 3.224V
Cell 5: 3.228V	Cell 5: 3.231V	Cell 5: 3.230V	Cell 5: 3.225V
Cell 6: 3.225V	Cell 6: 3.230V	Cell 6: 3.228V	Cell 6: 3.225V
Cell 7: 3.227V	Cell 7: 3.229V	Cell 7: 3.228V	Cell 7: 3.225V
Cell 8: 3.225V	Cell 8: 3.229V	Cell 8: 3.230V	Cell 8: 3.225V
Cell 9: 3.226V	Cell 9: 3.229V	Cell 9: 3.229V	Cell 9: 3.226V
Cell 10: 3.221V	Cell 10: 3.226V	Cell 10: 3.226V	Cell 10: 3.223V
Min / Max Cell	Min / Max Cell	Min / Max Cell	Min / Max Cell
Voltages: C10 / C5	Voltages: C10 / C2	Voltages: C10 / C5	Voltages: C3 / C2
Block Voltage:	Block Voltage:	Block Voltage:	Block Voltage:
32.282V	32.314V	32.321V	32.258V
Temperature Cell:	Temperature Cell:	Temperature Cell:	Temperature Cell:
24.772°C	24.534°C	24.813°C	24.402°C

	Device 1 Cell 1		Device 1 Cell 2
--	--------------------	---	--------------------

Durante os testes realizados, foi possível analisar o comportamento da placa PCB em relação a possíveis pontos quentes. Este teste permite analisar se algum componente está com temperatura excessiva, pois podem ocorrer pontos quentes, por exemplo, devido a uma soldadura mal efetuada ou algum componente danificado. Após várias horas de funcionamento, a temperatura do aparelho manteve-se dentro dos mesmos valores. Na Figura 5.6, é possível verificar através de uma fotografia tirada por uma câmara termográfica, o local onde a temperatura é mais elevada, que neste caso é onde está localizado o Max17852, mas bem dentro dos valores recomendados pelo fabricante (Integrated, 2020b).

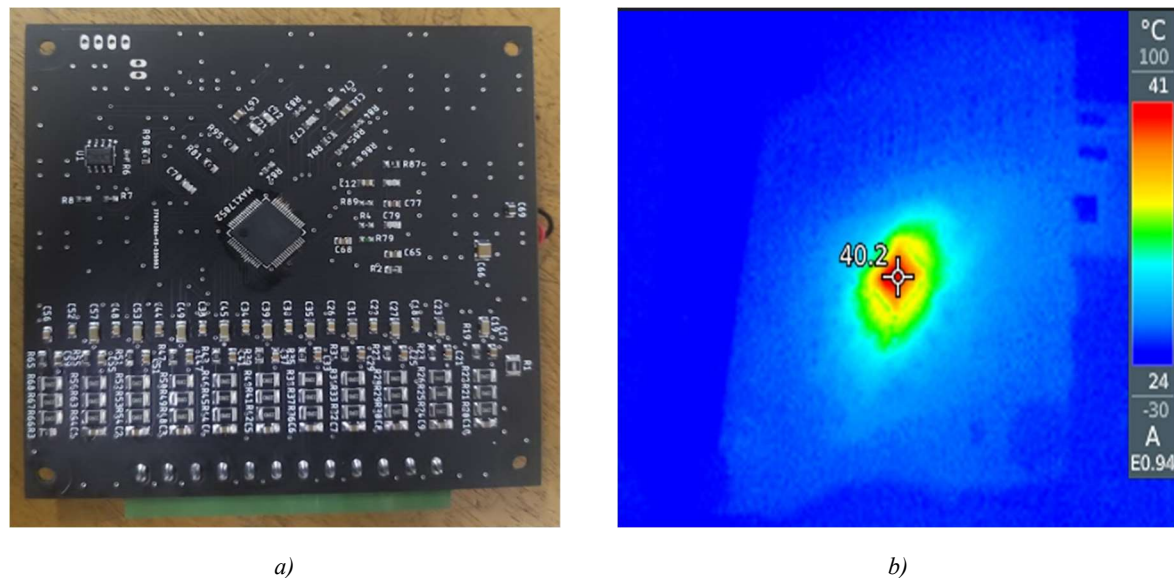


Figura 5.6 – a) Assemblagem da placa, b) Termografia realizada na placa CI.

5.1 Implementação do Balanceamento das Células através de software

Para implementar o balanceamento através do software desenvolvido, foi possível desenvolver melhorias que visam a proteção das células e o interface com o utilizador. Na Figura 5.7, apresentam-se os elementos salientados. Alert UV / OV Cells, através dos parâmetros ALRTOVCELL e ALRTUVCELL, indicam ao utilizador quais as células, que estão ligadas em cada placa PCB, que atingiram o valor de Undervoltage ou Overvoltage configurado, ((Integrated, 2020b) pág. 102).

Com a evolução dos ensaios, foi inserido o registo MSMTCH, que permite verificar o valor $V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}} < \text{MSMTCHREG}$ (configurado); caso seja verdadeiro, indicará a condição para iniciar o balanceamento das células ((Integrated, 2020b) pág. 104).

Foi também inserida a variável ActivCell para verificar as células com valor de tensão mais baixa, $V_{\text{mín}}$. Se a tensão da célula ativa for superior a $V_{\text{mín}} + 2\text{mV}$ será necessário balancear essa célula e o valor de ActivCell referente à célula passa a 1. Esta variável após a leitura envia o valor para BALSWEN, de forma a indicar as células que serão ativadas para realização de balanceamento. Neste ensaio, confirma-se que o valor entre $V_{\text{máx}}$ e $V_{\text{mín}}$ é de 8 mV, estando coerente com “NEED BALANCE: NO”, neste caso não seria necessário realizar balanceamento, devido à proximidade entre valores de tensão. A utilização deste sistema permite realizar um controlo bastante minucioso das células e da própria bateria, reduzindo as perdas de energia.

```

23:24:56.098 ->
23:24:56.098 -> Measurements Cells Block: 1
23:24:56.098 ->
23:24:56.098 -> Alert OV Cells: 0
23:24:56.143 -> Alert UV Cells: 0
23:24:56.143 ->
23:24:56.837 -> Cell 1: DEC Value: 3.206V
23:24:56.837 -> Cell 2: DEC Value: 3.206V
23:24:56.884 -> Cell 3: DEC Value: 3.208V
23:24:56.884 -> Cell 4: DEC Value: 3.206V
23:24:56.884 -> Cell 5: DEC Value: 3.211V
23:24:56.930 -> Cell 6: DEC Value: 3.207V
23:24:56.930 -> Cell 7: DEC Value: 3.208V
23:24:56.930 -> Cell 8: DEC Value: 3.207V
23:24:56.977 -> Cell 9: DEC Value: 3.208V
23:24:56.977 -> Cell 10: DEC Value: 3.203V
23:24:56.977 ->
23:24:56.977 -> ActivCell Value: 11111111
23:24:56.977 -> Min Cell: 10 = 3.203 / Max Cell: 5 = 3.211
23:24:57.022 -> Block Voltage: 32.107V
23:24:57.022 -> Temperature Cell: 24.106°C
23:24:57.022 -> Conclusion Read Cells Block: 1
23:24:57.022 ->
23:24:58.047 -> REALIZE BALANCE IF VMAX - VMIN < 0.010
23:24:58.047 -> NEED BALANCE: NO

```

Figura 5.7 – Aquisição de dados monitor série - Bloco de células 1.

O balanceamento das células é realizado em *Auto Individual Mode*. Na Figura 5.8 é possível visualizar o desenvolvimento realizado e a interface com o utilizador mostrando o estado do balanceamento. Quando iniciado o balanceamento, é indicado qual o valor de CBUVTHR (Cell-Balancing UnderVoltage Threshold), se este valor for atingido, os interruptores de balanceamento são desativados e irá aguardar que o tempo de CBTIMER seja igual a CBEXP [1-10], todos determinados com o mesmo tempo.

É exibido qual o tempo de balanceamento BALEXP [1-10], após iniciar a contagem, é indicado o estado de balanceamento através do CBACTIVE “Cell Balancing Operations are Active”, e após conclusão do balanceamento, o feedback ao utilizador será alterado, em condições normais, para “Cell Balancing Completed normally due to reaching CBUVTHR or CBEXP exit conditions”. É indicado também, o tipo de medição, CBUNIT, se o balanceamento for realizado em segundos ou em minutos e o CBCNTR, contador de 0 a 3 que é realizado em segundos, quando o modo de balanceamento de células está ativo. Todos os dados indicados acima são obtidos pelo registo BALSTAT (0x81), apenas para leitura.

```

DEVICE: 1          ...
Balancing
All cells are in balancing group mode
Balancing Time (BALEXP1): 14      Elapsed Time: 13
Value UVTHR: 3.203              Values of balancing:
Elapsed Time: 0                  Cell Balancing Operations are Active
Values of balancing:              CBTIMER measures Seconds
Cell Balancing Operations are Active
CBTIMER measures Seconds          Counter:
Counter:                          0
1                                  Elapsed Time: 13
Elapsed Time: 0                  Values of balancing:
Values of balancing:              Cell Balancing Operations are Active
Cell Balancing Operations are Active
CBTIMER measures Seconds          CBTIMER measures Seconds
Counter:                          Counter:
2                                  1
Elapsed Time: 1                  Elapsed Time: 14
Values of balancing:              Values of balancing:
Cell Balancing Operations are Active
CBTIMER measures Seconds          Cell Balancing Completed normally due to reaching CBUVTHR
Counter:                          CBTIMER measures Seconds
3                                  Counter:
...                                0
                                  End Balance: 1

```

Figura 5.8 – Registo de balanceamento verificado no monitor série do SW Arduino IDE - Bloco de células 1.

Quando é realizado o balanceamento, sendo este passivo, poderá existir sobreaquecimentos nas resistências utilizadas para o efeito. Deste modo, realizaram-se ensaios com a câmara termográfica durante um balanceamento, permitindo monitorizar as temperaturas de duas placas, realizando no total balanceamento de 20 células. Na Figura 5.9, pode-se verificar o ensaio realizado desde que a primeira placa inicia o balanceamento, passando para a segunda, confirmando-se o normal funcionamento, sem exceder os 50°C. A sequência apresentada, identifica a termografia durante o balanceamento, verificando-se o aquecimento quando todas as células são ativas e o arrefecimento quando as placas PCB arrefecem à temperatura ambiente após termino do balanceamento. Este ensaio foi realizado com tempo de balanceamento de 120 segundos.

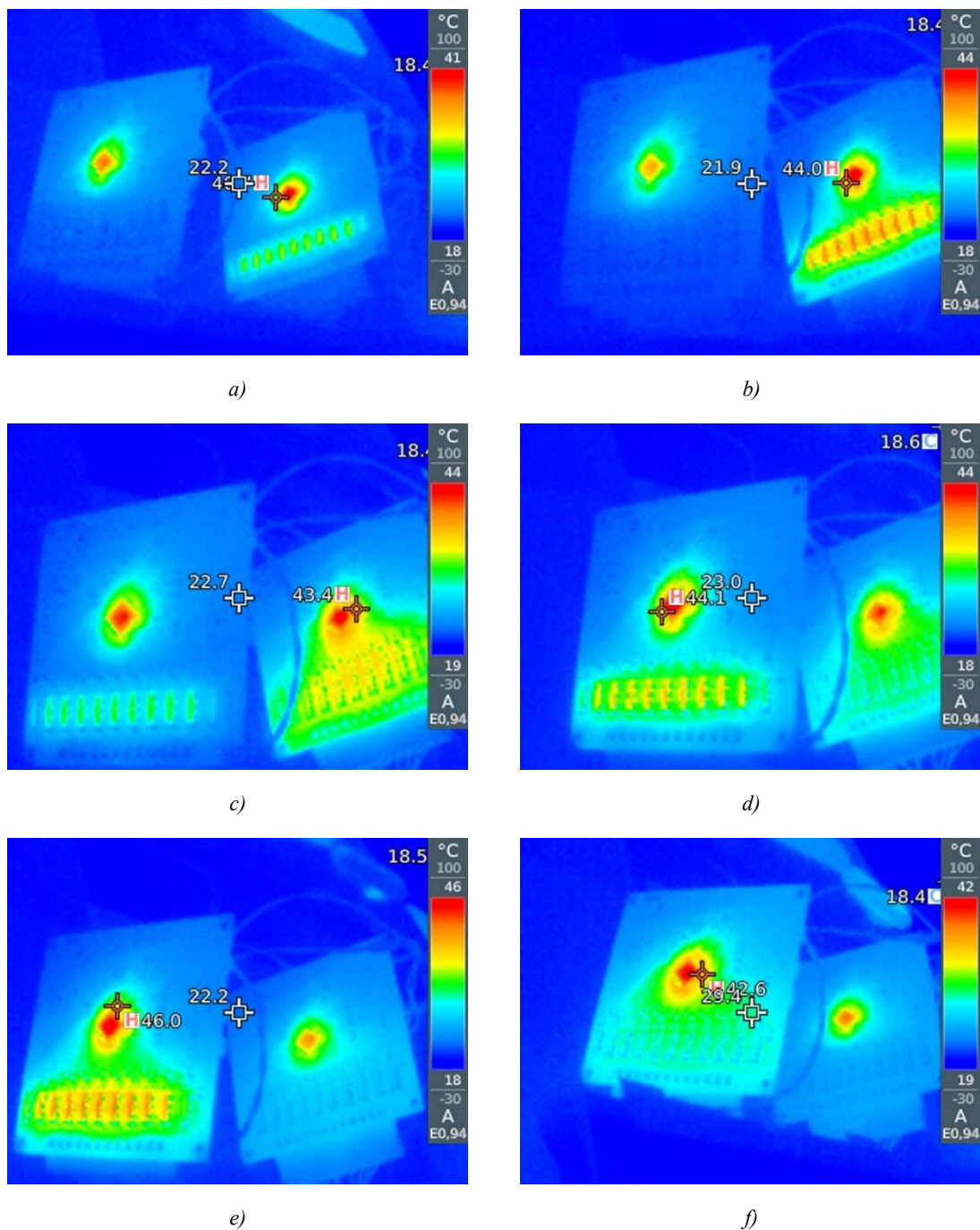


Figura 5.9 - Termografia realizada nas placas de CI durante o balanceamento.

Durante os ensaios realizou-se o balanceamento com objetivo de analisar o comportamento de tensão da bateria, com diferentes *duty-cycles* em função do tempo. Conforme abordado em, 3.5 Balanceamento das Células, o tipo de balanceamento usado no projeto é o modo passivo, e no Gráfico 1, verifica-se que é necessário realizar balanceamento durante um período considerável, para que seja notável a queda de tensão.

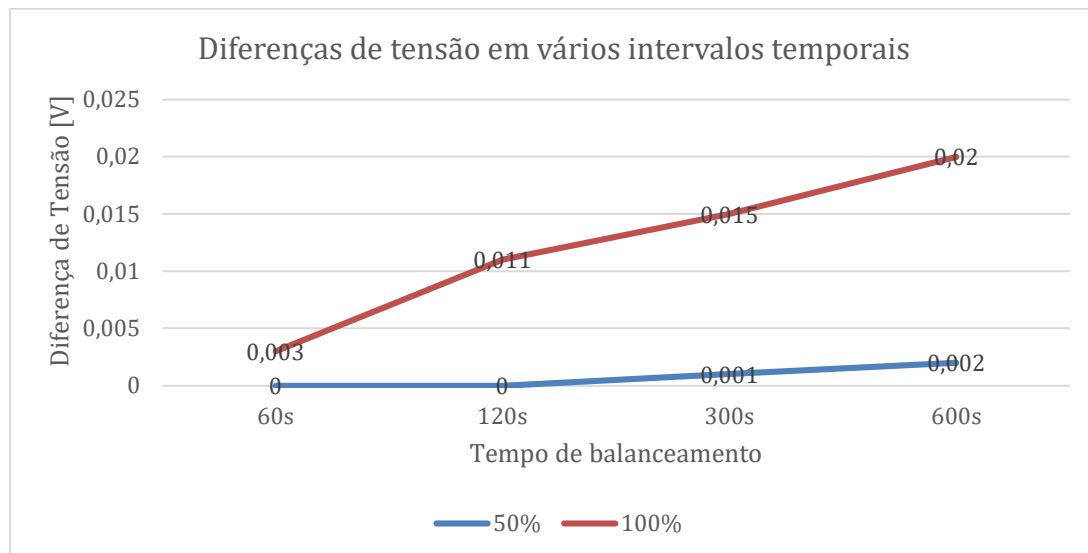


Gráfico 1 – *Duty-Cycle* de 50% e 100% com intervalos temporais num bloco de 10 células

Conforme mencionado acima, pode-se confirmar que ao fim de 10 minutos de balanceamento a tensão de bloco das 10 células apenas sofreu uma queda de tensão de 20mV.

Todos os resultados anteriormente realizados foram com a bateria original, 2.4.4 - Bateria Utilizada, mas tendo em conta as características da bateria, e o presente objetivo ser o teste das placas de CI de modo a verificar a sua versatilidade, realizaram-se testes de balanceamento com uma segunda bateria de forma a confirmar a fiabilidade dos resultados obtidos e a possibilidade de usar o BMS e efetuar o balanceamento com outras baterias.

Esta bateria, designada por bateria 2, é constituída por 10 células ligadas em série, da marca Xtar. A vantagem da utilização deste pack de células é que estas possuem um circuito de proteção integrado., presente na Figura 5.10, representa a bateria utilizada para realizar ensaios de funcionamento do BMS.

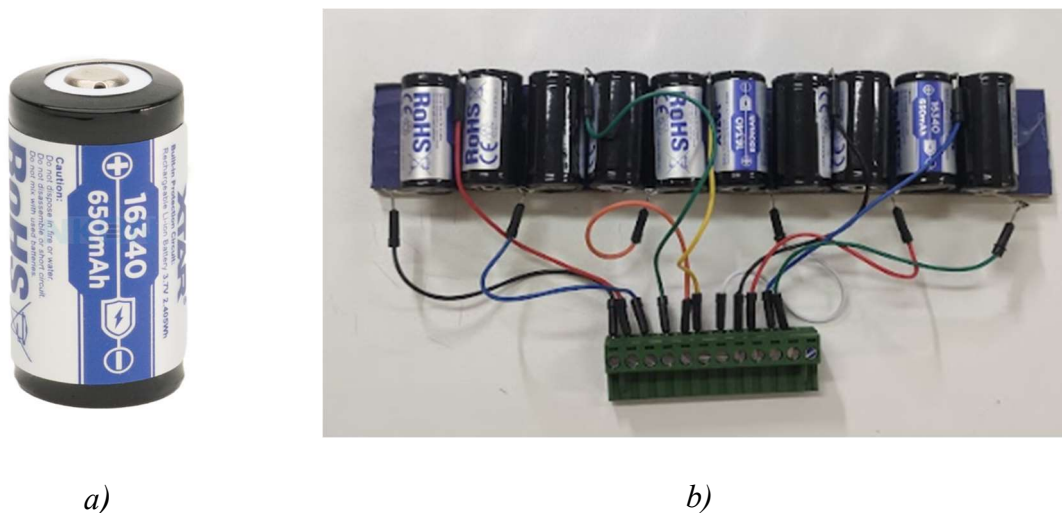


Figura 5.10 – a) Célula XTAR 16340 650 mAh b) Bateria 2 utilizada para realização de testes.

Este pack foi montado no laboratório de Automação do ISEC, para a realização dos ensaios. As suas características podem ser verificadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Características da bateria 2 utilizada durante os testes.

Especificações	Lithium-Ion Battery (LI-ion)
Capacidade (mAh)	650 mAh
Min/Max tensão células	2,5 V/4,2 V
Tensão nominal bloco	36 V
Corrente descarga (Ah)	1,2 Ah
Número células em série	1x10S

Um dos ensaios realizados foi a descarga da bateria 2 através de uma carga controlada de 30 W, de modo a poder comparar as leituras da placa CI com as do multímetro de precisão TENMA 72-13210, verificando a fiabilidade das leituras. No Gráfico 2, encontra-se o ensaio realizado.

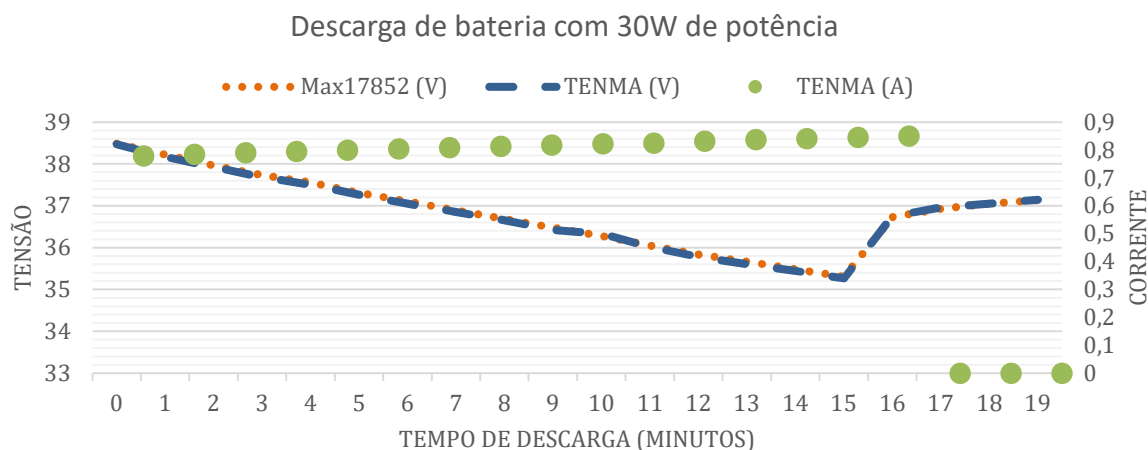


Gráfico 2 – Teste de descarga de bateria 2 com potência de 30 W.

Como indicado acima, este teste de descarga da bateria 2 permitiu comparar o tempo de resposta da placa de CI com o integrado Max17852 em relação ao equipamento TENMA, concluindo-se que comparando a tensão dos dois equipamentos no mesmo momento a diferença entre dispositivos foi no máximo 10mV, durante a descarga.

Foram realizados vários ensaios de balanceamento da bateria. De seguida será apresentado o registo de dois ensaios, com um tempo de 120 segundos, recordando que este tempo é 50% do valor real de balanceamento, conforme indicado em 4.5 - Balanceamento das Células, e o duty-cycle de 100%. De salientar que estes ensaios foram realizados com o registo CBMEASEN = 10, que desabilita o CBUVTHR, de modo a demonstrar a alteração da célula com a tensão mais baixa, “Min Cell” e também a queda de tensão do bloco ser bastante significativa em relação ao ensaio realizado anteriormente com a bateria original.

Na Figura 5.11 a) pode-se verificar os valores de tensão do bloco: antes de iniciar o balanceamento é de 40,827 V; através da variável “ActivCell”, os valores que se encontram a 0 serão as células que não serão balanceadas (células 4, 8 e 10), por estarem com valor igual ao valor “Min Cell” ou demasiado próximas, até +2 mV. Na Figura 5.11 b), verifica-se que o valor de tensão do bloco, após concluir o balanceamento é 40,685 V e os valores de “ActivCell” sofreram alteração, as células que não irão entrar em balanceamento serão as células 2 e 6., conforme pode ser visualizado no Gráfico 1, devido às características da bateria.

<pre> 21:15:29.491 -> Measurements Cells Block: 1 21:15:29.491 -> 21:15:29.491 -> Alert OV Cells: 0 21:15:29.491 -> Alert UV Cells: 0 21:15:29.491 -> 21:15:30.238 -> Cell 1: DEC Value: 4.086V 21:15:30.238 -> Cell 2: DEC Value: 4.055V 21:15:30.238 -> Cell 3: DEC Value: 4.106V 21:15:30.285 -> Cell 4: DEC Value: 4.052V 21:15:30.285 -> Cell 5: DEC Value: 4.105V 21:15:30.285 -> Cell 6: DEC Value: 4.055V 21:15:30.332 -> Cell 7: DEC Value: 4.116V 21:15:30.332 -> Cell 8: DEC Value: 4.054V 21:15:30.332 -> Cell 9: DEC Value: 4.103V 21:15:30.379 -> Cell 10: DEC Value: 4.054V 21:15:30.379 -> 21:15:30.379 -> ActivCell Value: 101110111 21:15:30.379 -> Min Cell: 4 = 4.052 / Max Cell: 7 = 4.116 21:15:30.379 -> Block Voltage: 40.827V </pre> <i>a)</i>	<pre> 21:22:52.143 -> Measurements Cells Block: 1 21:22:52.143 -> 21:22:52.143 -> Alert OV Cells: 0 21:22:52.143 -> Alert UV Cells: 0 21:22:52.143 -> 21:22:52.894 -> Cell 1: DEC Value: 4.075V 21:22:52.894 -> Cell 2: DEC Value: 4.036V 21:22:52.894 -> Cell 3: DEC Value: 4.085V 21:22:52.894 -> Cell 4: DEC Value: 4.050V 21:22:52.940 -> Cell 5: DEC Value: 4.082V 21:22:52.940 -> Cell 6: DEC Value: 4.037V 21:22:52.940 -> Cell 7: DEC Value: 4.095V 21:22:52.985 -> Cell 8: DEC Value: 4.050V 21:22:52.985 -> Cell 9: DEC Value: 4.083V 21:22:52.985 -> Cell 10: DEC Value: 4.050V 21:22:52.985 -> 21:22:52.985 -> ActivCell Value: 1111011101 21:22:52.985 -> Min Cell: 2 = 4.036 / Max Cell: 7 = 4.095 21:22:53.031 -> Block Voltage: 40.685V </pre> <i>b)</i>
---	--

Figura 5.11 – Valores de tensão verificados na bateria de testes T1, *a)* antes de iniciar o balanceamento, *b)* após terminar o balanceamento.

Durante o balanceamento, foram registados os valores de tensão da bateria, que permitiram obter o Gráfico 3. O valor de tensão representado no eixo y do gráfico representa a tensão do bloco das 10 células, com os valores iniciais e finais no gráfico indicados na Figura 5.11. Após o balanceamento são retiradas de funcionamento as resistências de carga, utilizadas no balanceamento passivo, e a tensão tem uma ligeira subida, estabilizando conforme se verifica após o minuto 4, do Gráfico 3.

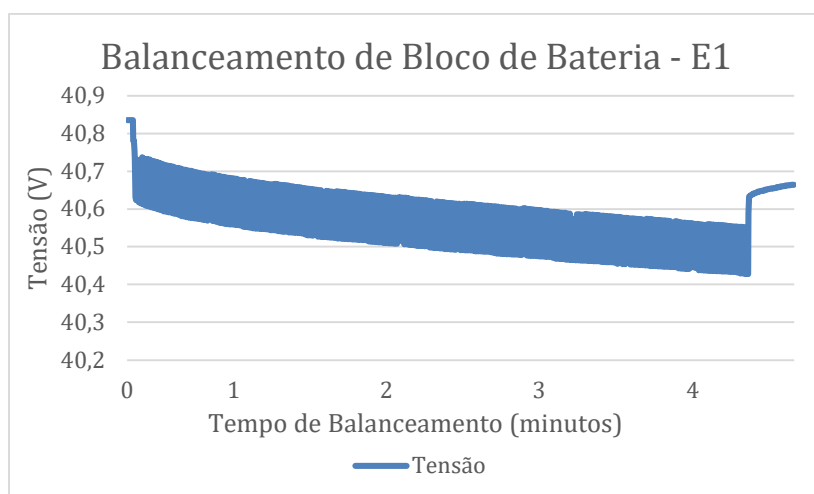


Gráfico 3 – Comportamento da tensão da bateria 2 durante o balanceamento, ensaio 1.

Conforme referido acima, serão apresentados dois ensaios de balanceamento com este modelo de bateria, no segundo balanceamento a tensão da bateria encontra-se mais baixa, que no primeiro ensaio, Figura 5.12.

<pre> 22:29:59.063 -> Measurements Cells Block: 1 22:29:59.063 -> 22:29:59.110 -> Alert OV Cells: 0 22:29:59.110 -> Alert UV Cells: 0 22:29:59.110 -> 22:29:59.811 -> Cell 1: DEC Value: 3.716V 22:29:59.857 -> Cell 2: DEC Value: 3.688V 22:29:59.857 -> Cell 3: DEC Value: 3.727V 22:29:59.857 -> Cell 4: DEC Value: 3.705V 22:29:59.905 -> Cell 5: DEC Value: 3.725V 22:29:59.905 -> Cell 6: DEC Value: 3.687V 22:29:59.905 -> Cell 7: DEC Value: 3.724V 22:29:59.952 -> Cell 8: DEC Value: 3.699V 22:29:59.952 -> Cell 9: DEC Value: 3.721V 22:29:59.952 -> Cell 10: DEC Value: 3.694V 22:29:59.952 -> 22:29:59.952 -> ActivCell Value: 1111011101 22:29:59.952 -> Min Cell: 6 = 3.687 / Max Cell: 3 = 3.727 22:30:00.000 -> Block Voltage: 37.126V </pre> a)	<pre> 22:34:55.169 -> Measurements Cells Block: 1 22:34:55.169 -> 22:34:55.169 -> Alert OV Cells: 0 22:34:55.169 -> Alert UV Cells: 0 22:34:55.169 -> 22:34:55.914 -> Cell 1: DEC Value: 3.697V 22:34:55.914 -> Cell 2: DEC Value: 3.688V 22:34:55.914 -> Cell 3: DEC Value: 3.703V 22:34:55.960 -> Cell 4: DEC Value: 3.684V 22:34:55.960 -> Cell 5: DEC Value: 3.701V 22:34:55.960 -> Cell 6: DEC Value: 3.687V 22:34:55.960 -> Cell 7: DEC Value: 3.701V 22:34:56.007 -> Cell 8: DEC Value: 3.680V 22:34:56.007 -> Cell 9: DEC Value: 3.699V 22:34:56.007 -> Cell 10: DEC Value: 3.674V 22:34:56.007 -> 22:34:56.007 -> ActivCell Value: 1111111111 22:34:56.007 -> Min Cell: 10 = 3.674 / Max Cell: 3 = 3.703 22:34:56.054 -> Block Voltage: 36.955V </pre> b)
---	--

Figura 5.12 – Valores de tensão verificados na bateria de testes T2, *a)* antes de iniciar o balanceamento, *b)* após terminar o balanceamento.

Antes de iniciar o balanceamento as células que não iriam realizar balanceamento seriam as células 2 e 6. Durante o ensaio verificou-se que o *ripple* da tensão, é mais baixo durante o balanceamento do que no primeiro ensaio, Gráfico 4, devido à curva de descarga da bateria.

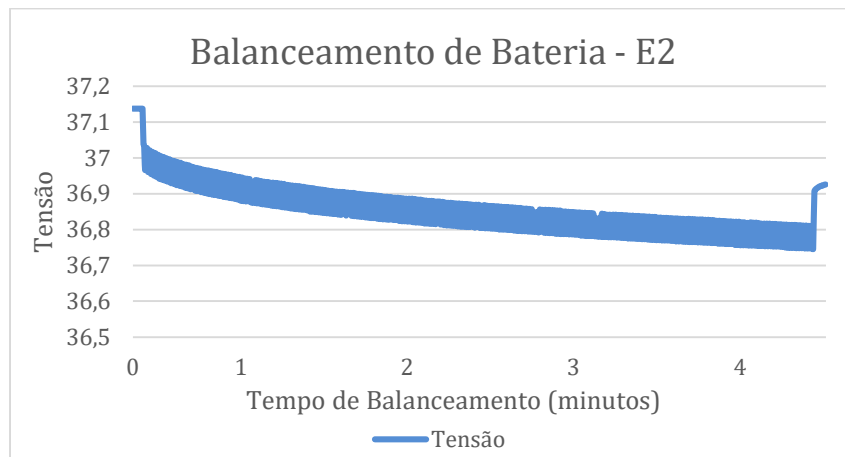


Gráfico 4 – Comportamento da tensão da bateria 2 durante o balanceamento, ensaio 2.

No Gráfico 5, foi realizado zoom aos gráficos anteriormente apresentados, e verifica-se que o formato das curvas não é homogéneo. No Anexo C, página 75, representa-se o funcionamento do balanceamento do BMS, este fenómeno acontece devido à comutação dos MOSFETs internos do Max17852 ((Integrated, 2020b) pág. 112).

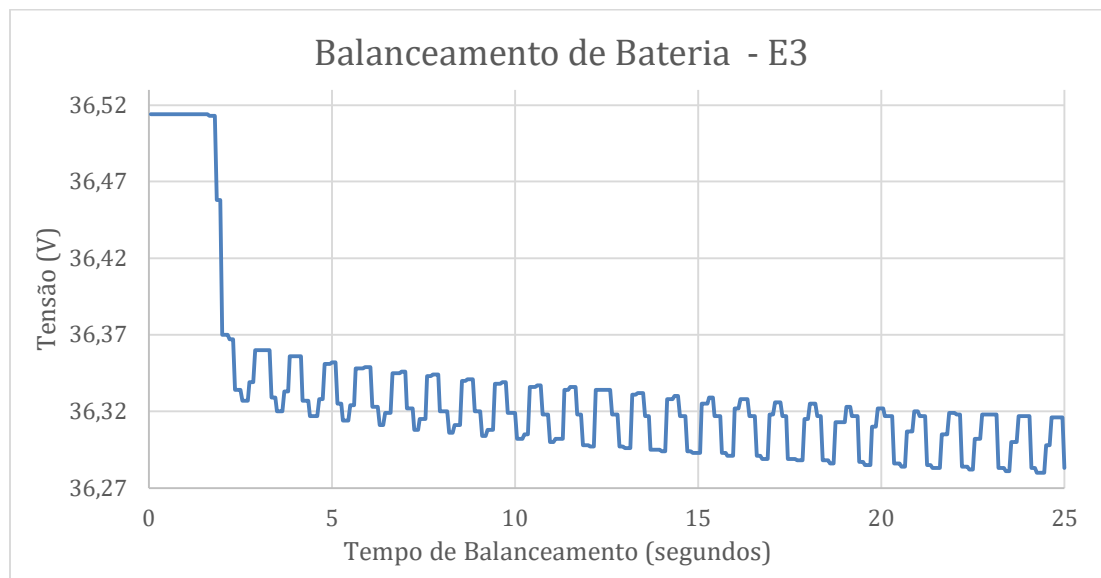


Gráfico 5 – Funcionamento dos MOSFETs durante o balanceamento.

Para que não exista sobreposição, é realizado um intervalo de $1\mu\text{s}$, denominado TNONOVERLAP, para que seja realizada a comutação entre os MOSFETs pares e ímpares. Sendo isto automático, apenas é necessário programar o registo BALSLEN uma vez para cada placa de CI.

Tendo em conta toda a especificidade do processo, foi elaborado um fluxograma global, que permite facilitar a compreensão de forma simplificada do projeto, conforme pode ser verificado na Figura 5.13.

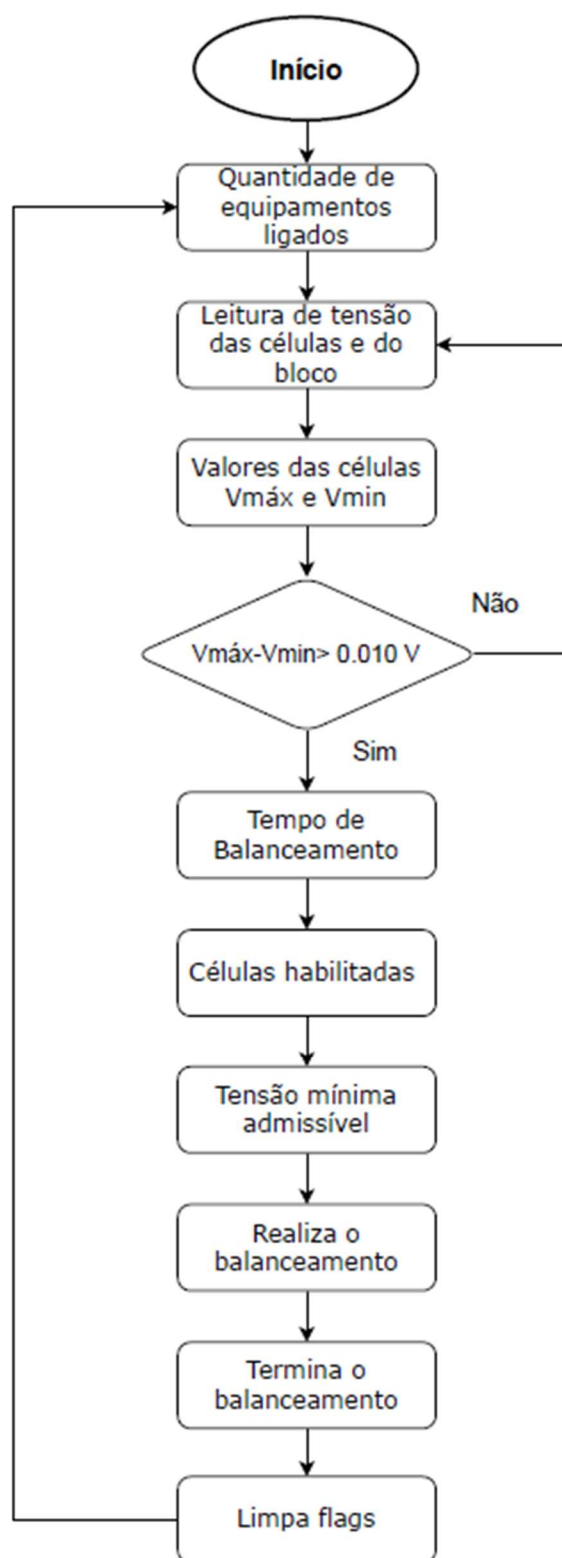


Figura 5.13 – Fluxograma do processo de medições, monitorização e balanceamento.

De forma a estes testes serem realizados em segurança e com melhor precisão, foram utilizados alguns equipamentos, como multímetros, uma pinça amperimétrica, uma fonte de alimentação, um osciloscópio, uma câmara termográfica e um equipamento para realização de carga, conforme pode ser visualizado na Figura 5.14.



a)



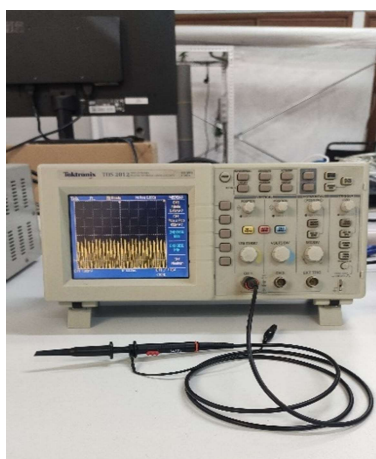
b)



c)



d)



e)



f)

Figura 5.14 – Equipamentos utilizados durante os testes.

Conforme mencionado na figura acima, os equipamentos utilizados durante o projeto: a) Câmara termográfica – marca: Testo, modelo: 868, b) Pinça amperimétrica – Marca: Multimetrix, modelo: CM 625, c) Fonte de alimentação – marca: TENMA, modelo: 72-13360, d) Multímetro de precisão – marca: BK PRECISION, modelo: 5491B, e) Osciloscópio – marca: Tektronix, modelo: TDS 2012, f) Carga eletrónica – marca: TENMA, modelo: 72-13210.

6 CONCLUSÃO

Neste projeto foi apresentado o desenvolvimento de um BMS para uma bateria de tipologia LiFePO₄, para aplicação num veículo elétrico. Pesquisou-se no mercado um circuito integrado que oferecesse uma solução completa, garantisse o correto funcionamento da bateria e fosse versátil para outras soluções da mesma tipologia. O circuito integrado do sistema de aquisição de dados utilizado foi o MAX17852, da Analog Devices, uma vez que se constatou que este dispositivo eletrônico é uma boa solução para utilização numa bateria reutilizada, devido ao sistema de segurança, que cumpre os requisitos ASIL e FMEA, e rigor na aquisição e tratamento de dados.

Foi realizado o esquemático e o layout das PCBs de modo a obter placas de pequena dimensão e que permitisse adaptar a sua utilização a diversas baterias, devido à sua capacidade de medição de temperatura, tensão e corrente. As PCBs desenvolvidas incluem todas as configurações de controlo e monitorização necessárias para a tipologia de baterias utilizada. Caso este sistema não esteja em comunicação com o computador, funciona em modo automático, ou seja, monitoriza as 40 células, comparando os valores obtidos e realiza o balanceamento das células, deste forma deixa de existir desequilíbrio entre células e permite prolongar a vida útil de uma bateria reutilizada.

O sistema BMS funciona com dois protocolos de comunicação *Battery-Management* UART e SPI, que comunicam entre si. Para maior segurança, a UART do MAX17852 possui codificação Manchester e a descodificação entre o Max17852 e o microcontrolador ESP32 é realizada através do Max17841.

Este BMS foi desenvolvido também com o objetivo de poder trabalhar com outras baterias da mesma tipologia e ser um sistema *open-source*, permitindo realizar alterações ao programa sempre que exista necessidade.

A tarefa de desenvolver hardware e software neste tipo de aplicações, durante o tempo disponível de realização do projeto de mestrado é uma tarefa árdua e minuciosa, onde é necessário possuir *know-how* e despende bastante tempo para obter resultados significativos. Este projeto possibilitou adquirir mais conhecimentos sobre veículos elétricos, baterias de tração e sistemas de gestão de baterias.

Como desenvolvimento de trabalhos futuros, existem vários temas que podem ser desenvolvidos:

1. O Max17852 dispõe de três modos de funcionamento (*Shutdown*, *Standby* e *Acquisition*). atualmente, encontram-se em funcionamento os modos *Standby* e *Acquisition*, seria útil otimizar o código de forma a colocar todos os modos em funcionamento. ((Integrated, 2020b) pág. 61)
2. Seria vantajoso desenvolver uma nova PCB para realizar a interface entre o microcontrolador e o Max17852 de forma a remover o Max17841 EV Kit.

3. O sistema de hardware desenvolvido permite agora estudar e aplicar algoritmos para estimar o Estado de Carga (SoC), Estado de Saúde (SoH) e outros projetos académicos e de pesquisa. Um trabalho futuro seria aplicar a bateria e respetivo BMS no VEIL (P. Pereirinha et al., 2013; P. G. Pereirinha et al., 2009), verificar o funcionamento e comparar com os resultados das baterias iniciais do veículo (P. G. Pereirinha et al., 2009).

Durante o desenvolvimento, este trabalho foi inserido na participação do projeto Agir4Innovation, que participará na iniciativa “Science2Business Meetup | Mostra de Resultados I&D+I do Politécnico de Coimbra”, que decorrerá no dia 26 de Abril de 2023, com a divulgação do vídeo “Minuto @gir – Sistema de gestão de baterias (BMS) para baterias de VE”.

Para concluir, recordar que do trabalho realizado, resultou a aceitação e apresentação da comunicação:

João L. Neto, Marco Silva, Paulo G. Pereirinha, “Development of a Battery Management System for Electric Vehicle’s Batteries Reuse”, 4th EAI International Conference on Sustainable Energy for Smart Cities, EAI SESC 2022, November 16-18, 2022. Original Location: Braga, Portugal (online).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

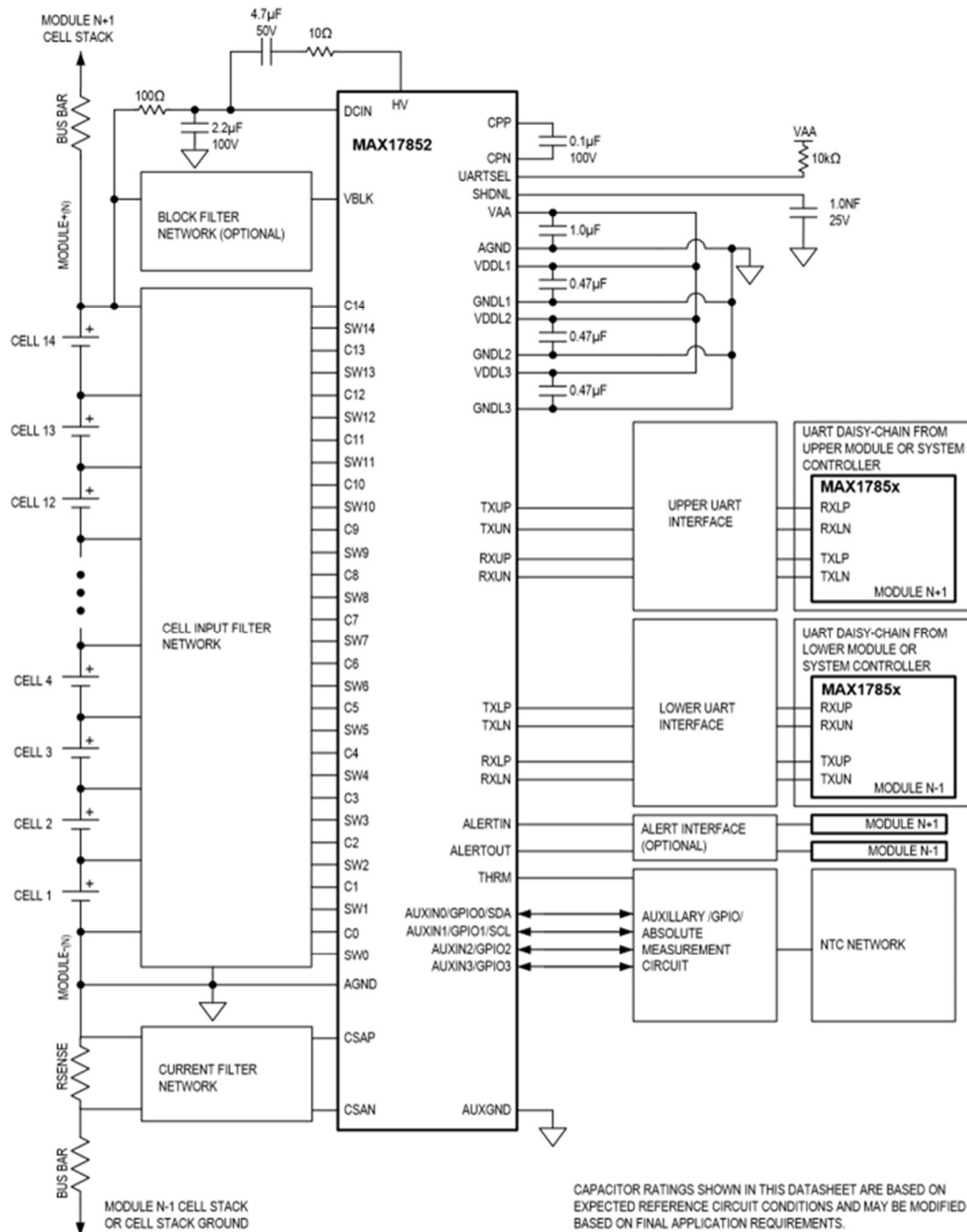
- Andrea, D. (2010). *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs* (A. House, Ed.).
- Arduino. (2022). *Arduino SPI*.
<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/spi/>
- Autodesk Inc. (2022). *Eagle Software*. autodesk.com/products/eagle/overview?term=1-YEAR&tab=subscription#what-is-eagle-
- Automotive, K. (2020). *Tecnologia e componentes da bateria do carro elétrico*.
<https://knaufautomotive.com/pt-br/tipos-de-baterias-de-carros-eletricos/>
- Bankole, O. E., Gong, C., & Lei, L. (2013). Battery Recycling Technologies: Recycling Waste Lithium Ion Batteries with the Impact on the Environment In-View. *Journal of Environment and Ecology*, 4(1), 14. <https://doi.org/10.5296/JEE.V4I1.3257>
- Buchmann, I. (n.d.). *Battery University*. Retrieved July 12, 2022, from <https://batteryuniversity.com/>
- Chen, T., Jin, Y., Lv, H., Yang, A., Liu, M., Chen, B., Xie, Y., & Chen, Q. (2020a). Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems. In *Transactions of Tianjin University* (Vol. 26, Issue 3). Tianjin University.
<https://doi.org/10.1007/s12209-020-00236-w>
- Chen, T., Jin, Y., Lv, H., Yang, A., Liu, M., Chen, B., Xie, Y., & Chen, Q. (2020b). Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems. In *Transactions of Tianjin University* (Vol. 26, Issue 3, pp. 208–217). Tianjin University.
<https://doi.org/10.1007/s12209-020-00236-w>
- Consulting, T. B. (2019). *Battery Packs of Modern xEVs - Report Extract*.
- Denios. (2021). *Armazenamento seguro de baterias de lítio - InterMETAL - Informação profissional para a indústria metalomecânica portuguesa*.
<https://www.intermetal.pt/Artigos/374375-Armazenamento-seguro-de-baterias-de-litio.html>
- Energy Agency, I. (2009). *Technology Roadmap*.
- Energy Agency, I. (2021). *World Energy Outlook 2021*. www.iea.org/weo
- EverExceed. (2022). *Bateria gel chumbo-ácido - EV series - monobloco / prismática / 12 V*. <https://www.directindustry.com/pt/prod/everexceed-industrial-co-ltd/product-103069-1850190.html>
- Frank Randy. (2021, July 26). *What is the difference between an NTC and a PTC thermistor?*
- Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanes-Montero, M. I., & Guerrero-Martinez, M. A. (2014). Battery equalization active methods. *Journal of Power Sources*, 246, 934–949. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.026>

- Henk Jan Bergveld, Peter H. L. Notten, & Wanda S. Kruijt. (2002). *Battery Management Systems*.
- Huang, J. (2020, November 6). *Uma comparação de NMC / NCA iões de lítio e LFP bateria*.
- Huang, M., Wang, C., Liu, B., Wang, F., & Wang, J. (2020). Quadrature Kalman filter-based state of charge estimation for lithium-ion battery. *Research Article Advances in Mechanical Engineering*, 7, 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814020942696>
- Instruments, T. (2019, March). *Comparing shunt- and Hall-based current-sensing solutions in onboard chargers and DC/DC converters*.
https://www.ti.com/lit/wp/sbaa318a/sbaa318a.pdf?ts=1641325010067&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- Integrated, M. (2018). *MAX17841B Evaluation Kit / General Description*.
www.maximintegrated.com
- Integrated, M. (2020a). *MAX17852 Evaluation Kit / General Description*.
www.maximintegrated.com
- Integrated, M. (2020b). *MAX 17852 - 14-Channel High-Voltage, ASIL D, Data-Acquisition System with Integrated Current-Sense*. www.maximintegrated.com
- Kim, J., & Cho, B. H. (2011). State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per-Unit System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(9), 4249–4260.
<https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2168987>
- Maxim Integrated. (2021, July 30). *How to Measure Voltage, Current and Temperature of a Battery Pack Using the MAXREFDES1277, Part 1*.
<https://www.youtube.com/watch?v=09CIWosaFN8>
- Michael, R. (2010). *The TAB Battery Book: An In-Depth Guide to Construction, Design, and Use* (1^a ed).
- Murnane, M., & Ghazel, A. (2017). *A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries*.
- NeoCharge. (2022). *Bateria de Carro Elétrico*. <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico>
- Neto, J., Silva, M., & Pereirinha, P. (2022). *Development of a Battery Management System for Electric Vehicle's Batteries Reuse*.
- Pereirinha, P. (2021). *Tracção e Veículos Eléctricos* (pp. 88–118).
- Pereirinha, P., Campos, A., Marques, A., Santos, F., Trovão, J., Silvestre, J., & Silva, M. (2013, July). *VEIL Project*.
https://www.isec.pt/pt/instituto/departamentos/dee/veil/index_en.htm
- Pereirinha, P. G. (2022). Electric vehicles. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00112-4>

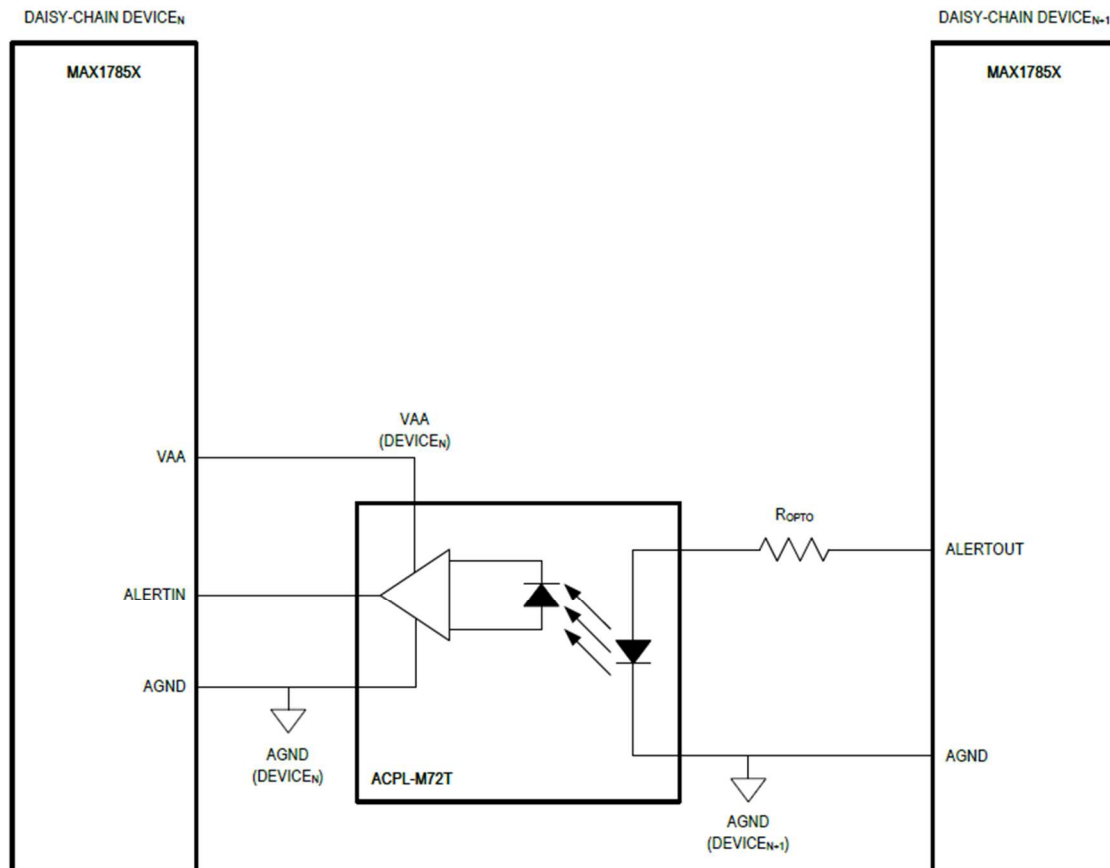
- Pereirinha, P. G., Trovao, J. P., Marques, L., Silva, M., Silvestre, J., & Santos, F. (2009). *Advances in the Electric Vehicle Project-VEIL Used as a Modular Platform for Research and Education*.
- Pistoia, G. (2010). *Electric and Hybrid Vehicles* (G. Pistoia, Ed.; 1ª).
- Pistoia, Gianfranco. editor. (role)edt (role)http://id. loc. gov/vocabulary/relators/edt, & Liaw, Boryann. editor. (role)edt (role)http://id. loc. gov/vocabulary/relators/edt. (2018). *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Battery Health, Performance, Safety, and Cost* (1st ed. 2018.).
http://lib.ugent.be/catalog/ebk01:3840000000347744
- Pop, V., Bergveld, H. J., Notten, P. H. L., & Regtien, P. P. L. (2005). State-of-the-art of battery state-of-charge determination. *Measurement Science and Technology*, 16(12), R93–R110. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/12/R01>
- Pritchard, E. (2009, October 5). *MAE 442 Automotive Engineering: Hybrids*.
<https://www.slideserve.com/keona/mae-442-automotive-engineering-hybrids-powerpoint-ppt-presentation>
- Shepard, J. (2022, March 14). *Li-ion batteries, Part 1: Building massless batteries - Battery Power Tips*. <https://www.batterypowertips.com/li-ion-batteries-part-1-building-massless-batteries-faq/>
- Sonnecy. (2022). *SONNECY Unidirectional Hall Effect DC Current Sensor*.
<https://www.sonnecy-shop.com/en/unidirectional-hall-effect-dc-current-sensor-cyhct-l20k-output-0-10v-dc-power-supply-12v-dc-window-oe20mm.html>
- Suppanz, B. (2018). *4pcb.com*. <https://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>
- TRUMPF. (n.d.). *Células e módulos de bateria*. Retrieved July 12, 2022, from https://www.trumpf.com/pt_PT/solucoes/setores/setor-automobilistico/eletromobilidade/celulas-e-modulos-de-bateria/

ANEXOS

Anexo A – SPI Interface com Single-Ended Alert



Anexo B – *Single-End ALERT Interface* no modo UART





Anexo D – Inicialização do programa em C++

```

/**
  @brief    Function is used for initialization of Esp32 microcontroller.
  */
void Initialization::Esp_32_init()
{
  Serial.begin(BAUDRATE); //setting the baudrate for PC to Arduino Communication
  Serial.println("MAX17852 BMS Code Version1");
  pinMode(SHDNL_MAX17841_1, OUTPUT);
  pinMode(SS1, OUTPUT); // Setting the Slave Select Pin as Output
  digitalWrite(SS1, HIGH); // disable Slave Select Pin
  digitalWrite(SHDNL_MAX17841_1, LOW); // RESET MAX17841
  delay(3);
  digitalWrite(SHDNL_MAX17841_1, HIGH); // Enable MAX17841
  delay(3);
  SPI.begin(); // Initializing the SPI in Micro-controller
  SPI.beginTransaction(SPISettings(SPI_FREQUENCY, MSBFIRST, SPI_MODE0)); //
  Initializing SPI frequency, SPI mode
}
/**
  @brief    Runs Initialization sequence for waking MAX17853/2 BMS IC.
  @details  Sends Wake up, Hello all, clears status/ FMEA alerts and enables measurments
  in cell channels.
  */
void Initialization::MAX1785X_init_sequence()
{
  wakeup(); // Wake up instructions for start up
  Device_count = helloall(); // Hello all command intializes the device address of the ICs in
  daisy chain. The returned number of devices is stored in variable "Device_count"
  init_address(Device_count); // Setting the Read and Write address for each device in daisy
  chain.
  clear_status_fmea(); // Clears status and FMEA.
  enable_measurement(); // enable voltage measurements.
}

/**
  @brief    Initializes the Read and Write address with obtained device count.
  @details  Changes the Write and read address as per Command-Byte Encoding as given
  in the Table 44 (MAX17852) datasheets
  */
void Initialization::init_address(int Device_count)
{
  for (int DAx = 0; DAx < Device_count; DAx++)
  {
    read_add[DAx] = (DAx << SHIFT_BY_THREE) + READDEVICE_LSB;
    write_add[DAx] = (DAx << SHIFT_BY_THREE) + WRITEDevice_LSB;
  }
}

```

Anexo E – Componentes implementados em cada PCB

Qty	Value	Device	Package	Parts
2		W237-6	W237-6	X1, X2
1	0	PINHD-1X2	1X02	JP2
17	0	R-EU_R0805	R0805	R3, R59, R60, R61, R62, R73, R74, R81, R87, R90, R94, R95, R110, R123, R124, R129, R130
4	0.01UF	C-EUC0805	C0805	C43, C80, C81, C82
21	0.1UF	C-EUC0805	C0805	C17, C18, C21, C22, C25, C26, C29, C30, C33, C34, C37, C38, C41, C44, C47, C48, C51, C52, C55, C56, C68
10	0.1UF	C-EUC1206	C1206	C19, C23, C27, C31, C35, C39, C45, C49, C53, C57
5	0.47UF	C-EUC0805	C0805	C11, C12, C42, C65, C67
1	1.02k	R-EU_R0805	R0805	R2
2	1.0UF	C-EUC0805	C0805	C59, C77
4	1.5k	R-EU_R1206	R1206	R70, R71, R76, R77
1	10	R-EU_R0603	R0603	R79
1	100	R-EU_R1210	R1210	R1
1	1000pF	C-EUC0805	C0805	C79
5	100K	R-EU_R0603	R0603	R69, R72, R75, R78, R86
1	100PF	C-EUC0805	C0805	C70
2	100k	R-EU_R0603	R0603	R4, R112
1	100pF	C-EUC1206	C1206	C91
15	10k	R-EU_R0603	R0603	R6, R7, R8, R89, R99, R100, R101, R113, R114, R115, R116, R117, R118, R119, R120
2	15k	R-EU_R0805	R0805	R57, R58
1	15pF	C-EUC0805	C0805	C89
4	18PF	C-EUC0805	C0805	C71, C72, C73, C74
15	1k	R-EU_R0805	R0805	R19, R23, R27, R31, R35, R39, R43, R47, R51, R55, R65, R102, R103, R104, R111
1	2.2UF	C-EUC1210	C1210	C66
4	22	R-EU_R0603	R0603	R82, R83, R84, R85
33	22	R-EU_R1210	R1210	R20, R21, R22, R24, R25, R26, R28, R29, R30, R32, R33, R34, R36, R37, R38, R40, R41, R42, R44, R45, R46, R48, R49, R50, R52, R53, R54, R56, R63, R64, R66, R67, R68
4	2200PF	C-EUC1206	C1206	C60, C61, C63, C64
2	3.3V	SP4021-01FTGSOD323	SOD323-R	D7, D8
2	360	R-EU_R0805	R0805	R108, R109
1	3900PF	C-EUC0805	C0805	C78
10	3900PF	C-EUC1206	C1206	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10
1	39pF	C-EUC0805	C0805	C92
1	4.7UF	C-EUC0805	C0805	C69
4	49.9	R-EU_R0805	R0805	R125, R126, R133, R134
7	5025840270	5025840270	CON_5025840270_MOL	ALARM_IN, ALARM_OUT, RXLP, RXUP, THERM1, THERM2, THERM3
1	5025840270	5025840270	CON_5025840270_MOL	TXUP
3	5V	SP4021-01FTGSOD323	SOD323-R	D1, D2, D3
4	600	FERRITE	C0805	L1, L2, L3, L4
1	AT24CS08-SSHM-B	AT24CS08-SSHM-B	SOIC8_4P9X3P9MC_MCH	U1
4	DFLS1100-7	DFLS1100-7	SDO_POWERDI123_DIO	CR2, CR4, CR5, CR6
1	MAX17852	MAX17852	MAX17852	U\$2
4	MOUNT-HOLE3.2	MOUNT-HOLE3.2	3,2	H1, H2, H3, H4
9	R0	R0	R0	U\$1, U\$3, U\$4, U\$5, U\$6, U\$7, U\$8, U\$9, U\$10
2	SESDONCAN1LT1G	SESDONCAN1LT1G	SOT-23(TO-236)_318-08_ON	CR1, CR3
2	SESDONCAN1LT1G	SESDONCAN1LT1G	SOT-23(TO-236)_318-08_ON	CR7, CR8
1	SSW-104-01-T-S	PINHD-1X4	1X04	JP1
1	TLP2770(TP,E	TLP2770(TP,E	SO6L_TOS	U2
1	TXLP	5025840270	CON_5025840270_MOL	TXLP

Anexo F – Lista de Materiais adquiridos – Parte 1

Designação	Quantidade
F2447642 - MCWR08X3600FTL - SMD Chip Resistor, 360	20,000
F2896907 - C0805C392J1GACAUTO - SMD Multilayer	100,000
F2494253 - GRM2165C1H392JA01D - SMD Multilayer	10,000
F2905270 - C0805C390J1GACAUTO - SMD Multilayer	10,000
F2447669 - MCWR08X49R9FTL - SMD Chip Resistor, 49.9 data entrega estimada 12/09/2022	50,000
F1510723 - PESD5V0U1BA,115 - ESD Protection Device,	20,000
F3014157 - V1FM10-M3/H - Schottky Rectifier, 100 V, 1 A,	20,000
F3638966 - MAX17852ACB/V+ - Data Acquisition System, 3.2 data entrega estimada 8/09/2022	6,000
F2008160 - MC000175 - Terminal Block, Header, 5 mm, 12	5,000
F1827478 - 502584-0270 - PCB Receptacle, Signal, 1.5 mm Prazo de entrega apos rutura de stock 20/08/2022	50,000
F2533275 - NUP2115LT1G - ESD Protection Device, FlexRay, Prazo de entrega apos rutura de stock 02/12/2022	20,000
F2774020 -B57867S0103J140 - Thermistor, NTC, 10 kohm,	20,000
F2008124 - MC000143 - Pluggable Terminal Block, 5 mm,12	5,000
F1827470 - 502578-0200 - Connector Housing, Single In Line	55,000

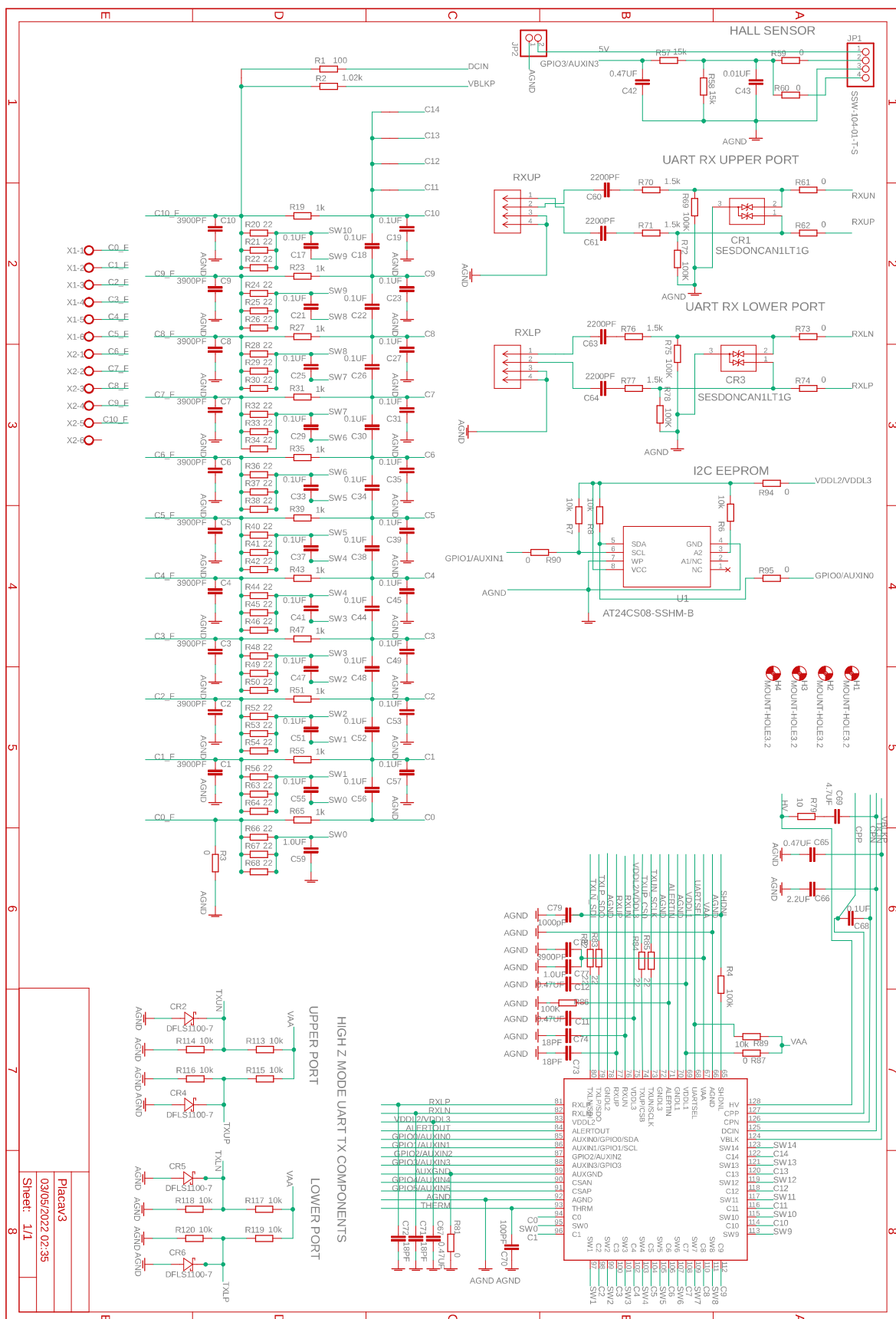
Anexo G – Lista de Materiais adquiridos – Parte 2

Designação	Quantidade
F2447642 - MCWR08X3600FTL - SMD Chip Resistor, 360	20,000
F2896907 - C0805C392J1GACAUTO - SMD Multilayer	100,000
F2494253 - GRM2165C1H392JA01D - SMD Multilayer	10,000
F2905270 - C0805C390J1GACAUTO - SMD Multilayer	10,000
F2447669 - MCWR08X49R9FTL - SMD Chip Resistor, 49.9	50,000
data entrega estimada 12/09/2022	
F1510723 - PESD5V0U1BA,115 - ESD Protection Device,	20,000
F3014157 - V1FM10-M3/H - Schottky Rectifier, 100 V, 1 A,	20,000
F3638966 - MAX17852ACB/V+ - Data Acquisition System, 3.2	6,000
data entrega estimada 8/09/2022	
F2008160 - MC000175 - Terminal Block, Header, 5 mm, 12	5,000
F1827478 - 502584-0270 - PCB Receptacle, Signal, 1.5 mm	50,000
Prazo de entrega apos rutura de stock 20/08/2022	
F2533275 - NUP2115LT1G - ESD Protection Device, FlexRay,	20,000
Prazo de entrega apos rutura de stock 02/12/2022	
F2774020 -B57867S0103J140 - Thermistor, NTC, 10 kohm,	20,000
F2008124 - MC000143 - Pluggable Terminal Block, 5 mm,12	5,000
F1827470 - 502578-0200 - Connector Housing, Single In Line	55,000

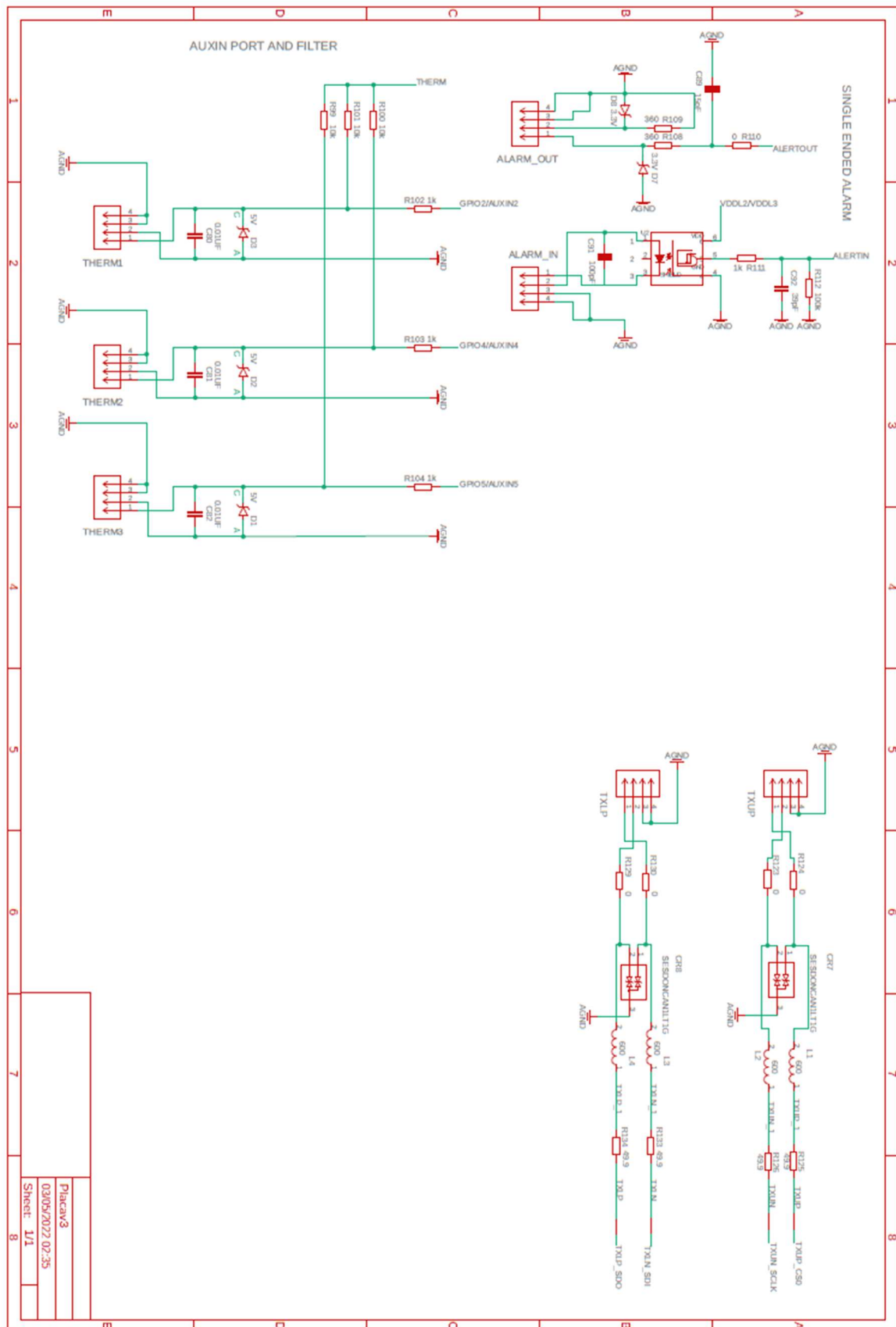
Anexo H – Lista de Materiais adquiridos – Parte 3

Designação	Quantidade
F3726935 - 502579-0100 - Contact, CLIK-Mate 502579, Pin, data entrega estimada 26/03/2022	110,000
F3360080 - MAX17841EVMINIU# - EVAL KIT, ASCI, BATT	1,000
F3551420 - 782853601 - Ferrite Bead, AEC-Q200, 0805	30,000
TLP2770(D4,E - Photo-IC 2.7-5.5V 5000Vrms .4mA 20Mbps data entrega estimada 02/05/2022	10,000
TME: RC0805FR-070RL - Resistor: thick film; SMD; 0805; 00	200,000
TME: C0805C105K9PACTU - Condensador: cerâmico; MLCC;	20,000
TME: CRCW060310K0FKTABC - Resistor: thick film; SMD;	200,000
TME: CRCW08051K00FKTABC - Resistor: thick film; SMD;	100,000
TME: CRCW060322R0FKTABC - Resistor: thick film; SMD;	100,000
TME: CL21A475KAQNNNG - Condensador: cerâmico; MLCC;	100,000
TME: AT24CS08-SSHM-B	10,000

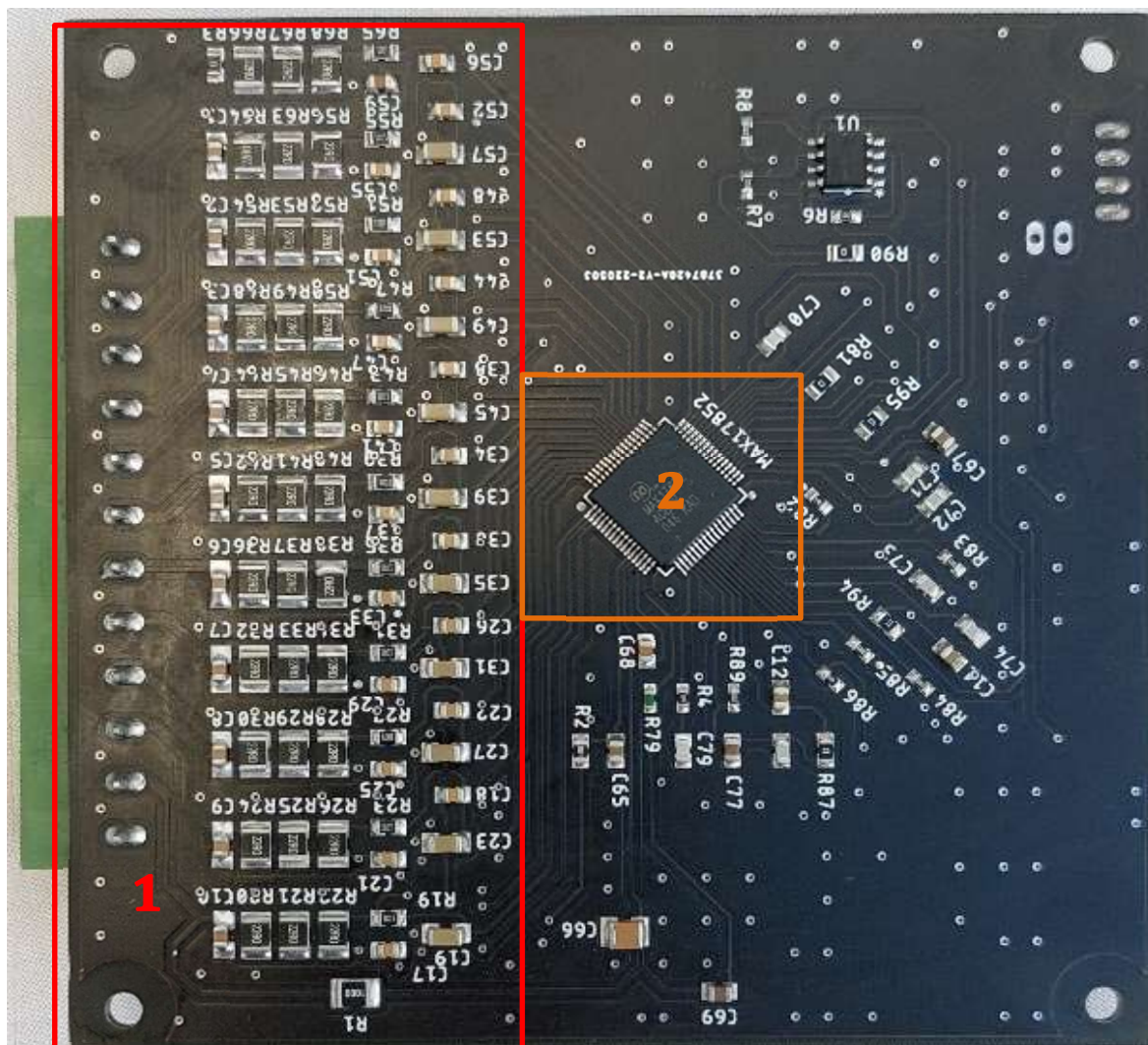
Anexo I – Esquemático da PCB – Parte 1



Anexo J – Esquemático da PCB – Parte 2



Anexo K – Bottom Layer PCB



Anexo L – Top Layer PCB

