



**UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO**



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Eletrônica e Sistemas



Graduação em Engenharia Eletrônica

Lucas Pereira Pesse

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
CARREGAMENTO INTELIGENTE PARA
BATERIAS DE LÍTIO-ÍON**

Recife

2023

Lucas Pereira Pesse

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
CARREGAMENTO INTELIGENTE PARA
BATERIAS DE LÍTIO-ÍON**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a): Prof. Guilherme Nunes Melo, D.Sc.

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Pesse, Lucas Pereira.

Desenvolvimento de um sistema de carregamento inteligente para baterias de lítio-íon / Lucas Pereira Pesse. - Recife, 2023.

83 p : il., tab.

Orientador(a): Guilherme Nunes Melo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Eletrônica - Bacharelado, 2023.

1. Baterias de lítio-íon. 2. Carregamento inteligente. 3. Monitoramento remoto. 4. Aquisição e transmissão de dados. 5. Automação. I. Melo, Guilherme Nunes. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Lucas Pereira Pesse

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CARREGAMENTO INTELIGENTE PARA BATERIAS DE LÍTIO-ÍON

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 30/06/2023

Banca Examinadora

Prof. Guilherme Nunes Melo, D.Sc.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Leonardo Didier Coelho, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Hermano Andrade Cabral, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

*À minha avó Maria Nely, a
eterna Dadaí*

Agradecimentos

Primeiramente, à minha mãe, Cassandra Virgínia, por estar sempre ao meu lado, me apoiando nos momentos difíceis e vibrando comigo em todas as minhas conquistas. Sem seu apoio, afeto e educação, jamais teria chegado onde cheguei e me tornado a pessoa que me tornei. Meu amor por você é infinito.

À minha família, por acreditar no meu potencial e me oferecer conforto sempre que precisei. Os bons momentos que passamos juntos fazem de mim uma pessoa verdadeiramente feliz. Obrigado por me ensinarem o que realmente significa amor e união.

Aos meus amigos, por sua lealdade, companheirismo e pelos momentos de distração que me permitiam respirar em meio às atribulações do dia-a-dia. Podemos seguir caminhos diferentes em nossas vidas, mas sempre estaremos ao lado uns dos outros.

Aos bons professores que me conduziram pelo longo e rico caminho acadêmico que trilhei. Em particular, agradeço meu orientador, Guilherme Nunes Melo, por ter me guiado durante o processo de desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus animais de estimação, Flock e Miona, pelo carinho mais sincero que pode existir.

E por fim, um agradecimento especial à minha querida avó Maria Nely, que sempre me incentivou a seguir o caminho da engenharia. Você pode não estar aqui para presenciar minha graduação, mas saiba que viverá para sempre em meu coração.

Nossas virtudes e nossos defeitos
são inseparáveis, assim como a
força e a matéria. Quando se
separam, o homem deixa de existir.

Nikola Tesla

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Eletrônica e Sistemas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica(Eng.)

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CARREGAMENTO INTELIGENTE PARA BATERIAS DE LÍTIO-ÍON

Lucas Pereira Pesse

A popularização de dispositivos eletrônicos móveis e a busca por fontes de energia eficientes e renováveis têm motivado o desenvolvimento de baterias comerciais recarregáveis, como as de lítio-íon. Devido aos riscos inerentes a esse tipo de bateria, surge a necessidade de tecnologias que permitam seu carregamento de forma segura, sem que haja perda da velocidade do processo. O trabalho apresentado descreve o estudo e o desenvolvimento de um sistema de carregamento inteligente para baterias de lítio-íon, no qual características relevantes da bateria são monitoradas ao longo do carregamento, garantindo a eficiência e a segurança do processo. O sistema consiste em um dispositivo carregador munido de sensores, os quais adquirem dados de tensão e temperatura da bateria. Esses dados são processados por um microcontrolador, cujo *software* determina e executa o desligamento do circuito de carga caso julgue necessário. As informações obtidas, bem como alertas relevantes, são transmitidos via *bluetooth* a um aplicativo *Android*, permitindo que o usuário seja recorrentemente atualizado do estado da bateria. Dessa forma, o sistema pode ser supervisionado de forma remota, auxiliando o usuário na tomada de decisões relativas ao desligamento do circuito de carga ou substituição da bateria.

Palavras-chave: Baterias de lítio-íon, carregamento inteligente, monitoramento remoto, aquisição e transmissão de dados, automação.

Abstract of Course Conclusion Work, presented to Department of Electronic and Systems, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Electronic Engineering(Eng.)

DEVELOPMENT OF A SMART CHARGING SYSTEM FOR LITHIUM-ION BATTERIES

Lucas Pereira Pesse

The popularization of mobile electronic devices and the search for efficient and renewable energy sources have motivated the development of commercial rechargeable batteries, such as lithium-ion batteries. Due to the inherent risks associated with this type of battery, there is a need for technologies that enable safe charging without sacrificing the speed of the process. The presented work describes the study and development of an intelligent charging system for lithium-ion batteries, in which relevant battery characteristics are monitored throughout the charging process, ensuring efficiency and safety. The system consists of a charging device equipped with sensors that acquire voltage and temperature data from the battery. This data is processed by a microcontroller, whose software determines and executes the shutdown of the charging circuit if deemed necessary. The obtained information, along with relevant alert messages, is transmitted via bluetooth to an Android application, allowing the user to be regularly updated on the battery's status. This way, the system can be remotely supervised, assisting the user in making decisions regarding the shutdown of the charging circuit or replacement of the battery.

Keywords: Lithium-ion batteries, smart charging, remote monitoring, data acquisition and transmission, automation.

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Justificativa	20
1.2	Objetivo Geral	20
1.2.1	Objetivos específicos	21
1.3	Organização do TCC	21
2	Fundamentação Teórica	23
2.1	Células Galvânicas e Baterias	23
2.1.1	Funcionamento de uma Célula Galvânica	24
2.1.2	A Pilha de Daniell	24
2.2	A Bateria de Lítio-Íon	25
2.2.1	Características das Baterias de Lítio-Ion	27
2.2.2	Carga e Descarga da Bateria de Lítio-Íon	28
2.2.3	Estado de Carga de uma Bateria de Lítio-Ion	29
2.3	O Transistor MOSFET	30
2.4	Comunicações Sem Fio	32
2.4.1	O Protocolo <i>Bluetooth</i>	33
2.5	Microcontroladores	34
2.5.1	O <i>Arduino</i>	35
2.5.2	Sensores	36
3	Metodologia	38
3.1	Sistema Proposto	39

3.2	Componentes Utilizados	40
3.2.1	Bateria de Litio-Íon 18650	40
3.2.2	Módulo de Carregamento TP4056	41
3.2.3	<i>Arduino UNO</i>	43
3.2.4	Sensor de Tensão	45
3.2.5	Sensor de temperatura LM35	46
3.2.6	Transistor MOSFET IRF9540	47
3.2.7	Módulo <i>Bluetooth</i> HC-05	49
3.2.8	<i>Software App Inventor</i>	51
4	Desenvolvimento	53
4.1	Módulo de Carga e Sensoriamento	53
4.1.1	<i>Hardware</i>	53
4.1.2	<i>Software</i>	57
4.2	Aplicativo de Monitoramento	61
5	Resultados e Síntese	64
5.1	Sensoriamento e Transmissão de Dados	65
5.2	Funcionamento Padrão	68
5.3	Desligamento de Emergência	71
6	Conclusão	74
6.1	Dificuldades Encontradas	76
6.2	Trabalhos Futuros	78
	Referências	80

Lista de Ilustrações

2.1	Representação de uma pilha de Daniell (Fonte: Atkins e Jones, 2012).	26
2.2	Curvas de carga de uma bateria de Li-Ion de 3 Ah (Fonte: Michelini, 2017).	29
2.3	Curva de descarga de uma bateria de Li-Ion a 1C (Fonte: Michelini, 2017).	30
2.4	Relação entre tensão e SoC para uma bateria Li-Ion (Fonte: Baronti et al., 2014).	31
2.5	Representação de um MOSFET de canal p (Fonte: Prokhorov e Gerzheva, 2011).	32
2.6	Faixa de radiofrequência e aplicações relacionadas (Fonte: Britannica, 2013).	33
2.7	Arquitetura básica de um microcontrolador (Fonte: Adaptado de Pérez e Areny, 2007).	35
2.8	IDE do <i>Arduino</i> (Fonte: O autor).	36
2.9	Exemplos de um sinal analógico e um digital (Fonte: Adaptado de Oppenheim e Willsky, 2010).	37
3.1	Bateria 18650 de 2600 mAh, fabricada pela <i>Gimex</i> (Fonte: O autor).	41
3.2	Módulo TP4056 com circuito de proteção (Fonte: O autor).	42
3.3	<i>Arduino UNO</i> (Fonte: O autor).	44
3.4	Diagrama de pinagem do <i>Arduino UNO</i> (Fonte: Arduino, 2023).	44
3.5	Sensor de tensão de 25 V_{cc} (Fonte: O autor).	45
3.6	Circuito interno do sensor de tensão (Fonte: ElectronicsHUB, 2023).	46

3.7	Sensor de temperatura LM35 (Fonte: O autor).	47
3.8	Transistor IRF9540N (Fonte: O autor).	48
3.9	Comparação da utilização de um NMOS e um PMOS como <i>switches</i> entre a fonte de alimentação e a carga (Fonte: Vishay-Siliconix, 1997).	49
3.10	Módulo <i>bluetooth</i> HC-05 (Fonte: O autor).	50
3.11	Janela <i>App Designer</i> do <i>App Inventor</i> (Fonte: O autor).	51
3.12	Janela <i>Blocks Editor</i> do <i>App Inventor</i> (Fonte: O autor).	52
4.1	Representação do protótipo do módulo de carga e sensoriamento (Fonte: O autor).	54
4.2	Esquema de interligação entre componentes do módulo de carga e sensoriamento (Fonte: O autor).	55
4.3	Protótipo físico do módulo de carga e sensoriamento (Fonte: O autor).	56
4.4	Fluxograma de funcionamento do módulo de carga e sensoriamento (Fonte: O autor).	58
4.5	Representação do funcionamento do aplicativo de monitoramento (Fonte: O autor).	62
4.6	<i>Layout</i> da tela do aplicativo de monitoramento (Fonte: O autor). . .	63
5.1	<i>Log</i> do sistema durante teste de aquisição e transmissão de dados (Fonte: O autor).	66
5.2	Dados dos sensores exibidos na tela do aplicativo de monitoramento (Fonte: O autor).	67
5.3	Planta baixa do ambiente para realização de testes, com indicação da qualidade da conexão <i>bluetooth</i> em diversos pontos (Fonte: O autor).	67
5.4	<i>Log</i> do sistema durante os últimos instantes de carregamento (Fonte: O autor).	69
5.5	Mensagem exibida pelo aplicativo de monitoramento após finalização do carregamento (Fonte: O autor).	69

5.6	Gráfico da tensão da bateria ao longo do período de carregamento (Fonte: O autor).	70
5.7	<i>Log</i> do sistema durante o teste de desligamento manual através do aplicativo de monitoramento (Fonte: O autor).	71
5.8	Mensagem exibida pelo aplicativo de monitoramento após aciona- mento do comando de desligamento (Fonte: O autor).	72
5.9	<i>Log</i> do sistema durante teste de desligamento por altas temperaturas (Fonte: O autor).	73
5.10	Mensagem exibida pelo aplicativo de monitoramento indicando detecção de sobretemperatura (Fonte: O autor).	73

Lista de Tabelas

2.1	Relação entre as tensões aplicadas de um MOSFET e suas regiões de operação (Fonte: O autor).	32
3.1	Características do sensor LM35 (Fonte: O autor).	47

Lista de Símbolos

E_{red}	Potencial de redução
Cu	Cobre
Zn	Zinco
Li	Lítio
CuSO_4	Sulfato de cobre
ZnSO_4	Sulfato de zinco
LiCoO_2	Óxido de lítio-cobalto
NiMH	Níquel-metal hidreto
NiCd	Níquel-cádmio
mV	Milivolt
Ah	Ampère-hora
mAh	Miliampère-hora
A	Ampère
mA	Miliampère
G	Terminal porta (<i>gate</i>) do MOSFET
S	Terminal fonte (<i>source</i>) do MOSFET
D	Terminal dreno (<i>drain</i>) do MOSFET
V_{GS}	Tensão entre porta e dreno
V_{th}	Tensão de limiar ou tensão de <i>threshold</i>
V_{DS}	Tensão entre dreno e fonte
I_{D}	Corrente de dreno
KHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
kb	Kilobit
V_{cc}	Tensão contínua de alimentação
GND	Terra de circuito eletrônico

$k\Omega$	Kiloohm
$^{\circ}\text{C}$	Grau celsius
W	Watt
V_s	Tensão da fonte
Hz	Hertz

Lista de Abreviações

ADC	Analog-Digital Converter
CID	Current Interrupt Device
CPU	Central Processing Unit
E/S	Entrada e Saída
G	Gate
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LED	Light Emitting Diode
Li-Ion	Lítio-Íon
MicroUSB	Micro Universal Serial Bus
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NMOS	N-channel Metal Oxide Semiconductor
PMOS	P-channel Metal Oxide Semiconductor
SoC	State of Charge
UART	Universal Asynchronous Receptor and Transmitter

Capítulo 1

Introdução

Nas últimas décadas, a popularização de dispositivos com conectividade com a *Internet* e alta capacidade de processamento, a exemplo de *notebooks*, *tablets* e *smartphones*, têm estimulado o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao armazenamento de grandes quantidades de energia, especialmente na forma de baterias recarregáveis. Esse tipo de bateria têm se tornado ainda mais relevante à medida que se amplia o debate acerca da necessidade da substituição de veículos movidos a combustíveis fósseis por veículos elétricos ou híbridos, os quais exigem fontes de energia embutidas e de rápida recarga, para garantir sua viabilidade a longo prazo. Nesse contexto, a busca por baterias mais eficientes e duráveis levou ao surgimento de um extenso campo de estudo, culminando na produção industrial de baterias recarregáveis baseadas em diversos tipos de materiais, com destaque às baterias de lítio-íon, ou Li-Ion (Julien et al., 2016).

Pesquisas sobre baterias de lítio-íon se iniciaram no início da década de 1980, resultando na comercialização da primeira bateria Li-Ion em 1991. Os primeiros modelos eram robustos e custosos, sendo utilizados principalmente em aplicações de médio e grande porte. Ao longo dos anos, o avanço na fabricação de novos compostos de lítio possibilitou o surgimento de baterias de tamanho reduzido, menor custo de manufatura e maior densidade de energia. Atualmente, as baterias de Li-Ion apresentam diversas vantagens em relação a outros tipos de baterias populares comercialmente, como as de níquel-metal hidreto (*NiMH*) e níquel-cádmio (*NiCd*).

Além de serem recarregáveis, elas são capazes de fornecer energia por mais tempo e apresentam maior tempo de vida útil, tornando-as bastante atrativas para a alimentação de dispositivos eletrônicos (Pistoia, 2014).

Outro conceito que vêm ganhando espaço nos últimos anos é o de *Internet* das Coisas, ou IoT (do inglês, *Internet of Things*). Inventado por volta de 1999, o termo apresenta uma definição bastante abrangente, sendo normalmente utilizado para descrever o uso de tecnologia embutida em objetos e equipamentos presentes no dia-a-dia das pessoas, concedendo-os a capacidade de transmitir e receber dados. Através dessa funcionalidade, é possível desenvolver sistemas de sensoriamento e automação envolvendo os referidos objetos, dando origem a tecnologias inteligentes que proporcionam comodidade e praticidade ao cotidiano das pessoas. Apesar do nome, o termo IoT não se aplica apenas a dispositivos com conexão à *Internet*, englobando também outros protocolos de comunicação que permitem a um usuário se comunicar de forma remota com um objeto presente em seu cotidiano (Berte, 2018).

Dada sua extensa aplicabilidade, a noção de *Internet* das Coisas pode ser adotada no contexto de baterias de lítio-íon, em especial durante seu carregamento. A partir do uso de um microcontrolador, sensores e outros componentes eletrônicos, é possível implementar um carregador inteligente, capaz de efetuar a carga de uma bateria e fornecer informações relevantes acerca do processo. Dessa forma, o usuário se torna capaz de checar o andamento do carregamento à distância, não necessitando estar com o equipamento em mãos para verificar o nível de tensão da bateria. Além disso, as informações recebidas dos sensores permitem que o usuário tenha uma ideia da eficiência e segurança do processo de carga, auxiliando na tomada de decisões referentes ao sistema, como o desligamento do carregador ou a substituição da bateria utilizada.

1.1 Justificativa

As baterias de lítio-íon têm se tornado mais populares a cada dia, especialmente devido a sua alta densidade energética e capacidade de recarga, encontrando aplicabilidade em diversos dispositivos e equipamentos presentes no dia-a-dia das pessoas. Entretanto, apesar de seus benefícios, o uso de baterias Li-Ion também apresenta riscos. A principal preocupação relativa a esse tipo de bateria é a chamada fuga térmica, um processo perigoso ocasionado pela exposição a altas temperaturas. Esse fenômeno pode ser descrito como uma retroalimentação descontrolada, na qual reações exotérmicas ocorrem dentro da bateria em decorrência do calor, aumentando ainda mais a sua temperatura interna e provocando novas reações. Como consequência, a fuga térmica pode provocar explosões e a emissão de gases tóxicos, além de produzir chamas que não podem ser facilmente apagadas por água ou extintores de incêndio convencionais (Galushkin et al., 2018).

Dessa forma, o desenvolvimento de um carregador inteligente, capaz de não apenas exercer seu papel usual, mas também de coletar informações sobre o estado da bateria que está sendo carregada, pode trazer maior comodidade ao usuário e segurança durante o processo de carregamento. O recebimento de informações atualizadas sobre a tensão e a temperatura, permitem ao usuário supervisionar o desempenho do carregador de forma remota, deixando-o ciente do estado de carga da bateria e permitindo tomar ações de forma rápida, caso perceba algum comportamento inesperado desses parâmetros. Além disso, a automação do sistema possibilita interromper o circuito de carga caso a tensão da bateria atinja certo valor pré-definido ou a temperatura ultrapasse um limiar de segurança, evitando o desgaste da bateria e a ocorrência de fuga térmica.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é estudar, elaborar, implementar e validar um sistema de carregamento inteligente para baterias de lítio-íon, capaz de realizar o

processo de carga de forma rápida e segura. O sistema deve também estabelecer uma comunicação sem fio entre o carregador e uma plataforma de monitoramento, fornecendo ao usuário informações relevantes baseadas nos dados adquiridos pelos sensores. Essas informações devem ser transmitidas e recebidas de forma periódica, permitindo que o usuário supervisione o processo de carga e identifique se o carregador está operando de forma adequada, contribuindo para a preservação da bateria e a segurança do sistema.

1.2.1 Objetivos específicos

- Implementar circuito de carga destinado ao carregamento de baterias de lítio-íon;
- Propor e elaborar *software* para aquisição, transmissão, tratamento e recepção de dados;
- Apresentar e implantar critérios para a interrupção automática do carregamento, proporcionando segurança ao sistema;
- Realizar a transmissão de dados sem fio entre o dispositivo de carga e uma plataforma de monitoramento;
- Elaborar e implementar protótipo para verificação das funcionalidades do sistema;
- Validar o sistema desenvolvido, submetendo-o a testes sob condições próximas às de um contexto de aplicação real.

1.3 Organização do TCC

O conteúdo deste TCC está dividido em seis capítulos. As referências encontram-se nas páginas finais. A seguir, um resumo dos capítulos seguintes do TCC.

Capítulo 2. Apresenta o referencial teórico necessário para a compreensão do sistema, expondo conceitos gerais sobre baterias de lítio-íon e seu processo de carga, sistemas de comunicação sem fio, microcontroladores, sensores e outros elementos relevantes ao funcionamento do carregador inteligente desenvolvido durante o projeto.

Capítulo 3. Apresenta a metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho, bem como um breve resumo acerca de cada um dos componentes eletrônicos adotados para o desenvolvimento do sistema.

Capítulo 4. Apresenta e ilustra todo o processo de desenvolvimento do sistema, englobando tanto a parte de *hardware* quanto o *software* elaborado para a aquisição, transmissão e recepção de dados.

Capítulo 5. Apresenta os resultados obtidos após a implementação do sistema, detalhando os testes aos quais o carregador foi submetido e o comportamento do sistema durante esse processo.

Capítulo 6. Apresenta as conclusões do trabalho e perspectivas acerca de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Nesse capítulo, serão abordados os temas que constituem o arcabouço teórico necessário para compreensão e desenvolvimento do sistema proposto. Será realizada uma breve discussão acerca de tópicos relevantes ao projeto - células galvânicas e baterias (em especial a de lítio-íon), transistores MOSFET, comunicações sem fio, microcontroladores (com ênfase no *Arduino*) e sensores.

2.1 Células Galvânicas e Baterias

Uma célula galvânica, popularmente conhecida como pilha, é um dispositivo no qual uma reação química espontânea gera um fluxo de elétrons por um circuito, produzindo uma corrente elétrica. Um conjunto de células unidas em série ou paralelo recebe o nome de bateria (Atkins e Jones, 2012).

As pilhas e baterias podem ser classificadas em primárias e secundárias. As primárias são aquelas que apresentam reações químicas internas de natureza irreversível. Isso significa que, após certo período de utilização, os constituintes internos desses dispositivos se alteram de forma a não conseguir mais produzir corrente elétrica. Em contrapartida, as pilhas e baterias secundárias apresentam reações químicas reversíveis. Dessa forma, elas podem recuperar sua capacidade de gerar corrente elétrica mediante a aplicação de determinada tensão e corrente sobre seus terminais. Por essa razão, as pilhas e baterias secundárias também são chamadas

de recarregáveis (Junior, 2013).

2.1.1 Funcionamento de uma Célula Galvânica

De maneira geral, uma célula galvânica é constituída por dois condutores metálicos denominados de eletrodos, mais um meio condutor iônico chamado de eletrólito. Os eletrodos são conectados entre si por meio de um circuito externo, através do qual circulará a corrente elétrica. O eletrólito, por sua vez, proporciona um caminho para a corrente elétrica dentro da célula, fechando o circuito como um todo (Atkins e Jones, 2012).

Os materiais que constituem os eletrodos são escolhidos de forma que um deles apresente um potencial de redução (E_{red}) maior que o outro. Dessa forma, o eletrodo de menor potencial redutor apresentará a tendência de sofrer uma reação química de oxidação, fornecendo elétrons ao outro eletrodo, o qual sofrerá uma reação química de redução. O eletrodo onde ocorre a oxidação é chamado de ânodo, enquanto o eletrodo em que ocorre a redução é chamado de cátodo (Oliveira e Oliveira, 2001).

Por sempre ocorrerem em conjunto, as reações de oxidação e redução podem ser chamadas de semi-reações, sendo ambas partes constituintes de uma reação global denominada oxirredução. Essa é a reação que ocorre de maneira espontânea dentro de uma célula galvânica, promovendo a conversão de energia química em energia elétrica (Ferreira et al., 2016).

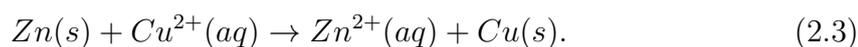
2.1.2 A Pilha de Daniell

Embora tenha sido inventada ainda no século XVIII, foi apenas no ano de 1836 que surgiu uma pilha capaz de manter uma corrente elétrica estável por um intervalo de tempo considerável. Construída pelo químico inglês John Frederic Daniell (1790 - 1845), a chamada Pilha de Daniell é utilizada até os dias de hoje para ilustrar o funcionamento geral de uma célula galvânica (Fontes et al., 2012).

Uma célula de Daniell é constituída por um eletrodo de cobre (Cu) e um eletrodo de zinco (Zn) imersos, respectivamente, em soluções de sulfato de cobre (CuSO_4) e

sulfato de zinco (ZnSO_4), as quais se encontram conectadas por uma barreira porosa ou tubo de vidro. Como o cobre apresenta potencial de redução superior ao do zinco, o eletrodo de zinco age como ânodo, ocorrendo neste a conversão de átomos de Zn em íons Zn^{2+} . Os elétrons liberados por esse processo de oxidação passam por um condutor externo e são encaminhados até o eletrodo de cobre (cátodo), no qual se unem aos íons Cu^{2+} , reduzindo-os a átomos de Cu. O contato entre as soluções de CuSO_4 e ZnSO_4 possibilita a troca de íons entre os eletrodos por dentro da própria célula, completando o circuito e permitindo o fluxo contínuo de corrente elétrica (Atkins e Jones, 2012). Uma representação esquemática da pilha de Daniell pode ser visualizada na Figura 2.1.

Segundo Azzellini (2017), o funcionamento da célula galvânica de Daniell pode ser resumido através das equações de oxidação do zinco e redução do cobre (Equações 2.1 e 2.2), as quais somadas, dão origem à reação global de oxirredução que ocorre na célula (Equação 2.3):



2.2 A Bateria de Lítio-Íon

Uma bateria de lítio-ion (Li-Ion) é um tipo de bateria secundária (recarregável), a qual produz energia elétrica através de reações químicas reversíveis, envolvendo a oxirredução de íons de lítio. Em geral, o ânodo de uma célula Li-Ion é constituído de átomos de lítio dispostos entre camadas de grafite (material esse representado como Li_xC_6), enquanto o cátodo é formado por um óxido metálico de lítio, como o LiCoO_2 . O eletrólito, por sua vez, costuma ser um sal de lítio dissolvido em um solvente orgânico (Silberberg, 2009).

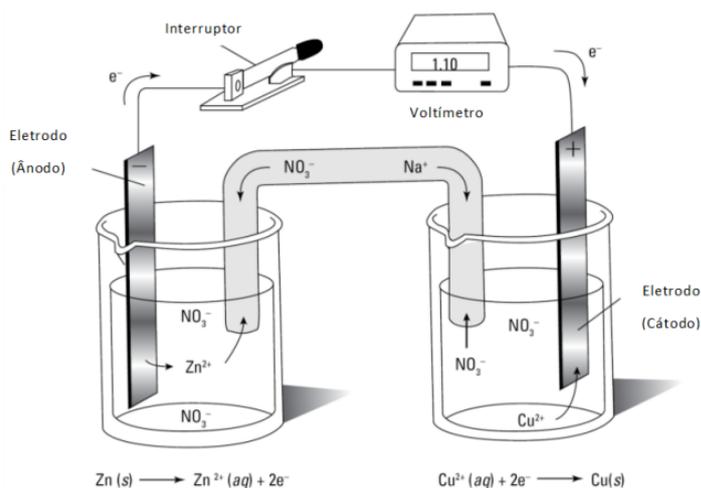
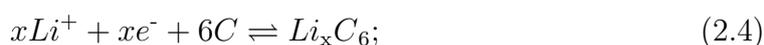
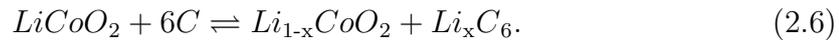
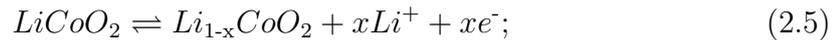


Figura 2.1: Representação de uma pilha de Daniell (Fonte: Atkins e Jones, 2012).

O mecanismo químico que rege uma célula de lítio-íon é similar ao de uma célula galvânica qualquer. Considerando um ânodo de Li_xC_6 e um cátodo de LiCoO_2 , tem-se que, durante o processo de geração de energia elétrica (descarga), os átomos de lítio do ânodo se separam das camadas de grafite, oxidando e convertendo-se em íons Li^+ . Os elétrons gerados por esse processo seguem até o cátodo, onde se combinam com moléculas da forma $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$, reduzindo-as a LiCoO_2 . O que diferencia esse processo daquele ocorrido em uma pilha de Daniell é que ele pode ser revertido, de forma que a aplicação de uma tensão elétrica sobre os terminais de uma célula de Li-Ion, induz a oxidação do LiCoO_2 e o surgimento de Li_xC_6 através da redução de íons Li^+ , retornando a célula ao seu estado original, isto é, recarregando-a (Julien et al., 2016).

O funcionamento de uma célula de Li-Ion típica, utilizada como exemplo, pode ser sintetizado pelas Equações 2.4, 2.5 e 2.6. Enquanto a primeira e a segunda descrevem as reações químicas que ocorrem no ânodo e no cátodo, respectivamente, a terceira representa a reação global da bateria. Em cada equação, a seta superior representa o processo de descarga, enquanto a inferior o processo de carga (Julien et al., 2016):





2.2.1 Características das Baterias de Lítio-Ion

As baterias de Li-Ion vêm sendo cada vez mais utilizadas no dia-a-dia, em aplicações que incluem - mas não se limitam a - carros elétricos, dispositivos médicos, *smartphones*, *drones* e satélites (Grey e Hall, 2020). A popularização das baterias de Li-Ion se deve em grande parte às suas características intrínsecas, as quais a tornam interessantes, tanto industrial quanto comercialmente (Michelini, 2017). Algumas dessas características são descritas a seguir:

- Alta densidade energética: devido ao pequeno tamanho dos íons de lítio, células de Li-Ion são capazes de armazenar alta quantidade de energia por unidade de massa e volume, de forma que uma única célula consegue fornecer uma tensão típica relativamente alta, geralmente de 3,0 a 4,2 V (Julien et al., 2016);
- Baixa autodescarga: quando comparada a outras baterias comerciais, como as de níquel-cádmio (NiCd) e as de níquel-metal hidreto (NiMh), as baterias de Li-Ion apresentam menor taxa de autodescarga, isto é, perdem uma quantidade menor de carga ao longo do tempo enquanto não estão sendo utilizadas (Michelini, 2017);
- Pouca ou nenhuma ocorrência de efeito memória: diversos tipos de bateria apresentam o que é chamado de efeito memória, uma condição na qual a carga máxima da bateria se reduz após carregamentos parciais sucessivos, prejudicando a vida útil da bateria. Esse efeito não se verifica na maior parte das baterias de Li-Ion, ocorrendo apenas em baterias já danificadas ou constituídas de materiais bastante específicos (Sasaki et al., 2013).

Apesar de apresentarem diversas características positivas, as baterias de Li-Ion

também apresentam suas desvantagens, sendo a principal delas o fato dessas baterias serem altamente inflamáveis. A presença de calor em excesso pode provocar um aumento descontrolado da temperatura interna das células de Li-Ion, fenômeno esse chamado de fuga térmica. Como consequência, as células podem irromper em chamas, provocando incêndios e explosões (Kong et al., 2018).

Devido aos riscos inerentes às baterias de Li-Ion, é necessário que os dispositivos desenvolvidos para seu carregamento possuam alguma forma de proteção contra altas temperaturas, a fim de manter a integridade das baterias e proteger o usuário (Julien et al., 2016).

2.2.2 Carga e Descarga da Bateria de Lítio-Íon

Para tratar da carga e descarga das baterias de lítio-íon, é necessário definir os significados de capacidade de uma bateria e de “taxa C”. O primeiro conceito se refere à corrente que uma bateria pode fornecer durante certo período, sendo geralmente medida em ampere-hora (Ah) ou miliampere-hora (mAh). Uma bateria de $3.700mAh$, por exemplo, é capaz de fornecer uma corrente elétrica de $370mA$ durante 10 horas ($370mA \times 10h = 3.700mAh$). Quando uma bateria está sendo carregada ou descarregada com uma corrente de valor igual ao de sua capacidade, diz-se que há uma corrente de 1 C passando por seus terminais, sendo essa a “taxa C” em que a bateria está sendo carregada ou descarregada. Valores como $0,5C$ e $2C$ indicam que a corrente que atravessa os terminais da bateria equivale à metade e ao dobro de sua capacidade, respectivamente (Michelini, 2017).

Explanados os conceitos de capacidade e taxa C, é possível detalhar o procedimento típico de carregamento das baterias de Li-Ion, o qual se divide em duas etapas. Na primeira, aplica-se uma corrente constante sobre a bateria, variando normalmente de $0,2C$ a $0,7C$, até que cada célula da bateria atinja um valor de tensão próximo a tensão máxima nominal (geralmente de $4,0$ a $4,2V$). Na segunda etapa, mantém-se a tensão sobre a bateria constante, até que a tensão pare de aumentar ou a corrente de carga caia para um determinado valor, normalmente em

torno de 10% de seu valor inicial (Michellini, 2017). Um exemplo das curvas típicas de tensão e corrente durante a carga de uma bateria de Li-Ion pode ser visualizado na Figura 2.2.

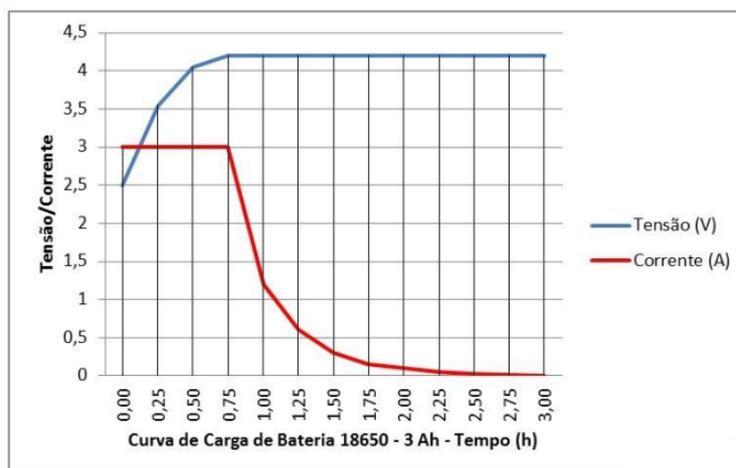


Figura 2.2: Curvas de carga de uma bateria de Li-Ion de 3 Ah (Fonte: Michellini, 2017).

Em relação à descarga, as baterias de Li-Ion costumam descarregar até 3 V ou 2,5 V. De maneira geral, a corrente de descarga desse tipo de bateria depende de sua fabricação e da aplicação em que está sendo utilizada. É importante ressaltar que descarregar uma bateria de Li-Ion abaixo de sua tensão mínima, cria o risco do surgimento de um curto-circuito dentro da bateria e, subsequentemente, de incêndios e explosões decorrentes do processo de fuga térmica (Michellini, 2017). Um exemplo da curva típica de descarga de uma bateria de Li-Ion pode ser visualizado na Figura 2.3.

2.2.3 Estado de Carga de uma Bateria de Lítio-Ion

Em sistemas destinados ao carregamento de baterias, um conceito bastante importante é o de estado de carga (SoC, do inglês *State of Charge*). O SoC é um indicador de quanta carga útil uma bateria ainda é capaz de fornecer, sendo geralmente expresso em termos percentuais de um valor de referência. A estimativa precisa do estado de carga possibilita otimizar o carregamento de uma bateria, prolongando sua vida útil. Determinar esse valor, no entanto, não é uma tarefa simples,

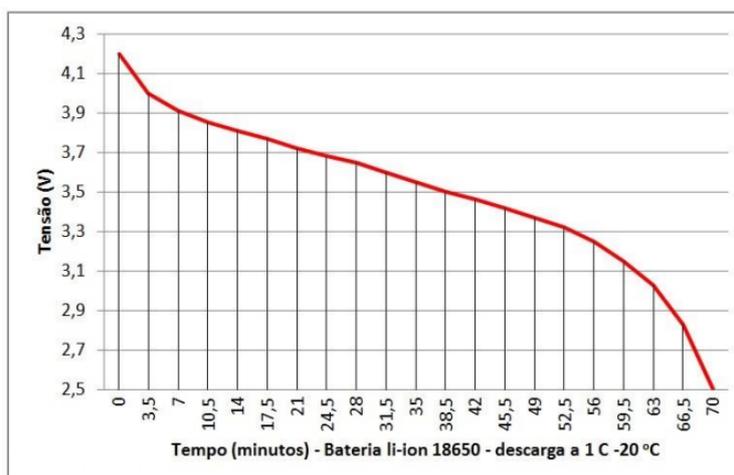


Figura 2.3: Curva de descarga de uma bateria de Li-Ion a 1C (Fonte: Michelini, 2017).

visto que o SoC depende de diversos fatores, como taxa de carga ou descarga, temperatura e vida útil remanescente da bateria (Man et al., 2012).

Em geral, o SoC de uma bateria está relacionado com sua tensão de circuito aberto. No caso das baterias de lítio-íon, essa relação muda dependendo se a bateria está sendo carregada ou descarregada. De maneira geral, para um mesmo valor de tensão, uma bateria de Li-Ion que está sendo carregada apresenta um estado de carga superior a uma bateria Li-Ion que está sendo descarregada (Baronti et al., 2014). Esse fenômeno, chamado de histerese de tensão, pode ser verificado no gráfico da Figura 2.4.

2.3 O Transistor MOSFET

Um transistor é um dispositivo eletrônico que possui três terminais, utilizado principalmente na amplificação de sinais elétricos e no chaveamento de circuitos eletrônicos. De uma maneira geral, o transistor funciona a partir da aplicação de uma tensão entre dois de seus terminais, a fim de se controlar a corrente que atravessa o terceiro terminal (Sedra e Smith, 2004).

Dentre os diferentes tipos de transistor existentes, um dos mais importantes para a eletrônica é o MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, ou transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor, em uma tradução livre).

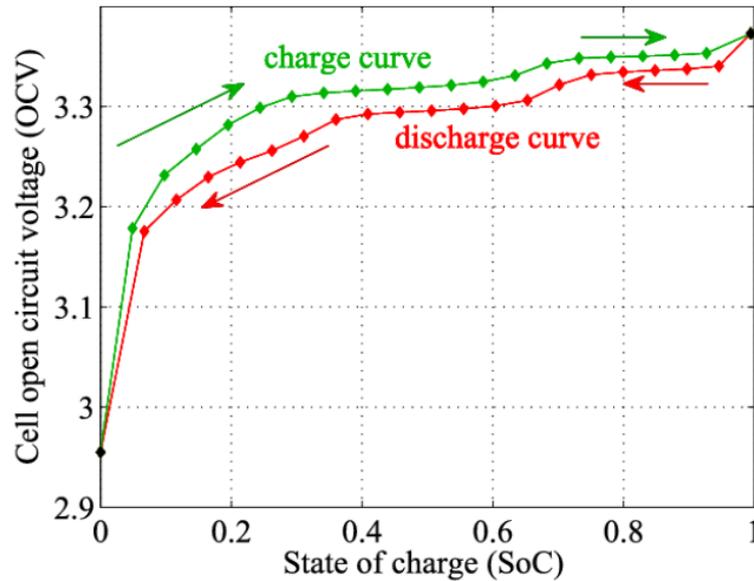


Figura 2.4: Relação entre tensão e SoC para uma bateria Li-Ion (Fonte: Baronti et al., 2014).

Um MOSFET pode ser classificado como sendo de canal n (NMOS) ou canal p (PMOS), dependendo de sua composição. Um MOSFET de canal n apresenta duas regiões formadas por material semicondutor do tipo n implantadas em um substrato do tipo p , enquanto um MOSFET de canal p apresenta estrutura simétrica, com duas regiões do tipo p imersas em um substrato do tipo n . Em ambos os casos, o substrato é interligado a um terminal chamado de porta (G , do inglês *gate*), enquanto as regiões implantadas no substrato são interligadas cada uma a um terminal distinto, chamados de fonte (S , do inglês *source*) e dreno (D , do inglês *drain*) (Rezende, 2004). Uma representação esquemática de um MOSFET pode ser verificada na Figura 2.5.

O funcionamento de um MOSFET depende diretamente da tensão aplicada entre os terminais G e S (V_{GS}). No caso do NMOS, não há corrente elétrica significativa circulando pelo transistor até que V_{GS} supere uma tensão específica intrínseca ao transistor, chamada de tensão de limiar ou tensão de *threshold* (V_{th}). Quando V_{GS} ultrapassa V_{th} , um “canal” surge entre a fonte e o dreno, possibilitando a passagem de corrente entre os terminais. O valor dessa corrente, chamada de corrente de dreno (I_D), depende do valor de V_{GS} e da tensão aplicada entre os terminais D e S do transistor (V_{DS}). Se V_{DS} superar a diferença $V_{GS} - V_{th}$, I_D torna-se aproximadamente constante. O funcionamento de um PMOS é análogo, sendo os valores de tensão e

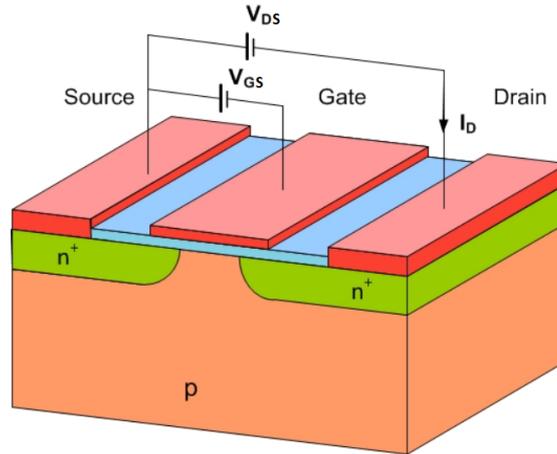


Figura 2.5: Representação de um MOSFET de canal p (Fonte: Prokhorov e Gerzheva, 2011).

corrente complementares aos do NMOS (Sedra e Smith, 2004).

O comportamento apresentado pelo MOSFET pode ser classificado em três regiões de operação distintas. Quando não há corrente entre a fonte e o dreno, diz-se que o componente está na região de corte. Quando a corrente elétrica se torna praticamente constante, diz-se que o dispositivo está na região de saturação. Em qualquer outro caso, diz-se que está na região de triodo (Sedra e Smith, 2004). Em geral, costuma-se utilizar MOSFETs operando entre as regiões de corte e saturação, especialmente em aplicações que fazem o uso de chaveamento (Rezende, 2004). A Tabela 2.1 apresenta a relação entre as tensões aplicadas sobre os terminais dos MOSFETs e suas regiões de operação.

Modo de Operação	NMOS	PMOS
Corte	$V_{GS} < V_{th}$	$V_{GS} > V_{th}$
Saturação	$V_{GS} > V_{th}$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$	$V_{GS} < V_{th}$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$
Triodo	$V_{GS} > V_{th}$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$	$V_{GS} < V_{th}$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$

Tabela 2.1: Relação entre as tensões aplicadas de um MOSFET e suas regiões de operação (Fonte: O autor).

2.4 Comunicações Sem Fio

Comunicações sem fio, também chamadas de comunicações *wireless*, são definidas como todas e quaisquer transferências de dados que ocorram sem a necessidade de

fios e cabos. Uma comunicação *wireless* pode ser tanto de curto alcance, como é o caso do envio de sinais de um controle remoto para uma televisão, quanto de longo alcance, como no caso de transmissões de dados via satélite. Através de comunicações sem fio, é possível realizar a transmissão de informação de forma digital ou analógica (de Oliveira Medeiros, 2007).

Nos dias atuais, grande parte das comunicações sem fio é realizada através de ondas eletromagnéticas cujas frequências se situam na faixa de 3 kHz a 300 GHz , conhecida como espectro de radiofrequência ou, simplesmente, radiofrequência (Vieira e Pereira, 2018). Uma ilustração dessa faixa do espectro eletromagnético pode ser visualizada na Figura 2.6.

Dentro da faixa de radiofrequência existem diversas bandas reservadas internacionalmente para utilização em aplicações industriais, científicas e médicas; conhecidas como bandas ISM (abreviação de *Industrial, Scientific and Medical*). Diversos protocolos de comunicação utilizados no dia-a-dia fazem uso das bandas ISM, como o *Wi-Fi* e o *Bluetooth* (Khumbar, 2017).

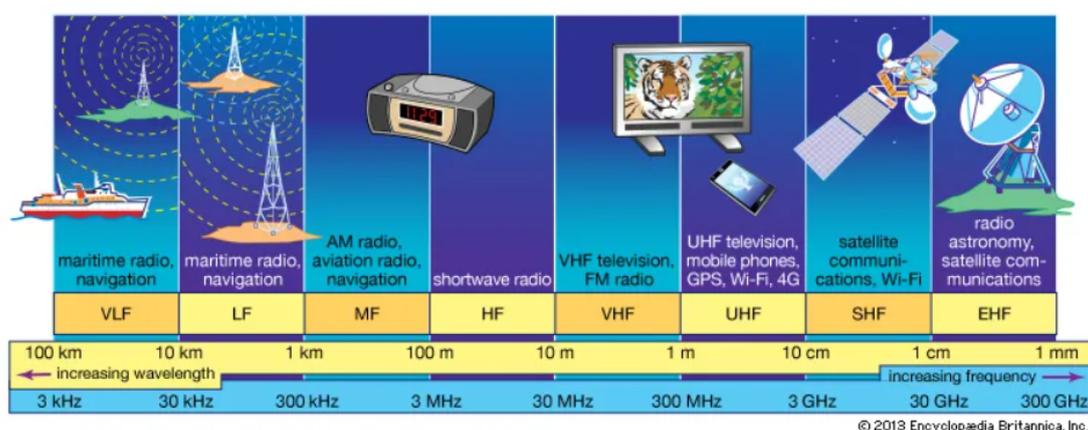


Figura 2.6: Faixa de radiofrequência e aplicações relacionadas (Fonte: Britannica, 2013).

2.4.1 O Protocolo *Bluetooth*

O *bluetooth* é um protocolo de comunicação desenvolvido por um grupo de empresas do setor de tecnologia liderado pela *Ericsson*, tendo sido introduzido ao público em 1998. Operando na frequência de $2,4\text{ GHz}$, o *bluetooth* foi criado para permitir

a conexão entre dispositivos próximos, sem a utilização de fios. Essa tecnologia é caracterizada pelo seu pouco consumo energético, baixo custo de implementação e curto raio de alcance (alguns poucos metros). Dessa forma, o protocolo costuma ser utilizado em aplicações que exigem transmissão de dados à curta distância, especialmente entre um celular e outro dispositivo (Verma et al., 2015).

2.5 Microcontroladores

Um microcontrolador pode ser definido como um microcomputador produzido na forma de circuito integrado, isto é, fabricado como um *chip*. De uma maneira geral, o microcontrolador, como qualquer microcomputador, pode ser dividido em três componentes fundamentais: a unidade de processamento central (CPU, do inglês *Central Processing Unit*), a memória, e sua entrada e saída (E/S). Esses componentes são interconectados eletricamente, sendo tais conexões chamadas de *buses* (Pérez e Areny, 2007).

A CPU comporta-se como o “núcleo de funcionamento” de um microcontrolador, sendo responsável pela interpretação e execução de instruções, bem como a efetuação de operações lógicas e matemáticas. A memória é responsável por armazenar os dados e instruções necessários utilizados pela CPU, enquanto os componentes de E/S possibilitam a conexão com dispositivos periféricos para recepção e envio de dados (Pérez e Areny, 2007). Um esquema sintetizando a arquitetura de um microcontrolador pode ser visualizado na Figura 2.7.

Uma das aplicações mais importantes dos microcontroladores são os chamados sistemas embarcados. De forma sucinta, um sistema embarcado nada mais é que um sistema microprocessado embutido no dispositivo por ele controlado. Dessa forma, é possível dizer que esse tipo de sistema utiliza um microcontrolador para executar tarefas pré-determinadas dentro de um contexto específico, destoando de um computador pessoal, o qual apresenta a flexibilidade de realizar diversas tarefas. Por executar um conjunto restrito de instruções, um sistema embarcado pode ser otimizado quanto ao número de recursos necessários para sua implementação, reduzindo

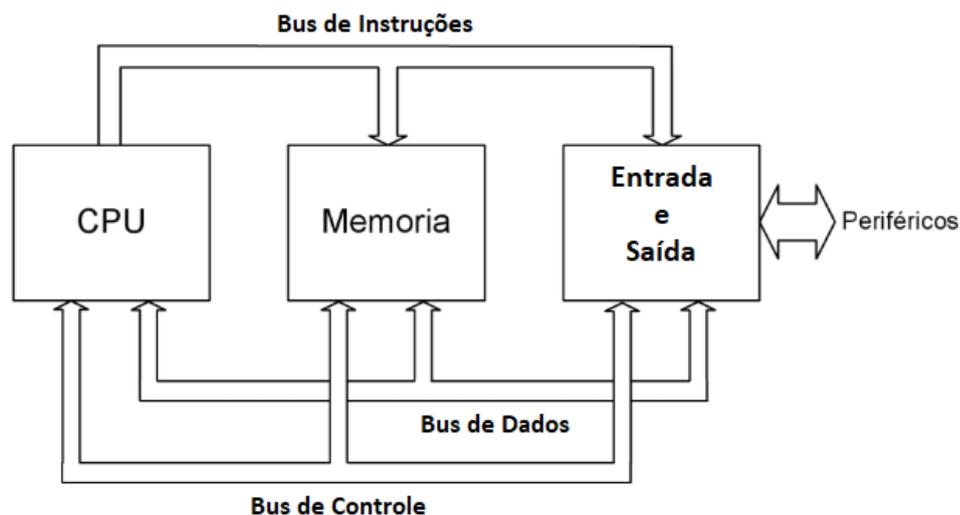


Figura 2.7: Arquitetura básica de um microcontrolador (Fonte: Adaptado de Pérez e Areny, 2007).

consideravelmente seu custo (Ganssle, 2008).

2.5.1 O *Arduino*

O *Arduino* é uma plataforma voltada para a criação de protótipos eletrônicos, constituída por um microcontrolador programável e dotada de entradas e saídas embutidas, possibilitando a comunicação do dispositivo com diversos componentes periféricos, como sensores e atuadores. Desenvolvido em 2005 por engenheiros e estudantes que desejavam criar um sistema de prototipagem de fácil acesso, o *Arduino* se consolidou como uma ferramenta de baixo custo, simples aprendizado e alta flexibilidade. O desenvolvimento de *software* para o *Arduino* ocorre por meio de funções escritas nas linguagens de programação C e C++ (de Alencar Júnior et al., 2019).

Todo *software* desenvolvido para o *Arduino* contém ao menos duas funções, isto é, dois blocos de código que descrevem aquilo que deve ser executado pelo microcontrolador. A primeira função, chamada de *setup*, é executada uma única vez no momento de inicialização do programa, sendo geralmente responsável pelas configurações iniciais do sistema desenvolvido. A segunda, chamada de *loop*, é repetida continuamente após a execução da função *setup*, sendo responsável pela funcionali-

dade geral do sistema desenvolvido. A função *loop* apenas deixa de ser executada quando o *Arduino* é desligado ou quando um novo programa é carregado em sua memória (Arduino, 2013).

Um *print* do ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do *Arduino*, aplicação em que se desenvolve programas para o dispositivo, pode ser visualizado na Figura 2.8.

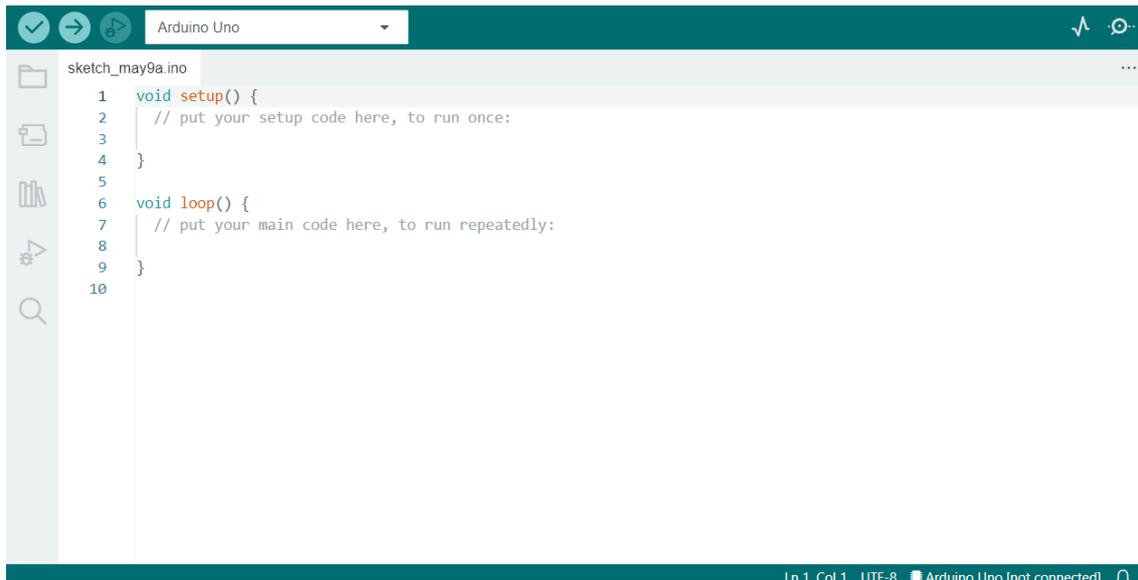


Figura 2.8: IDE do *Arduino* (Fonte: O autor).

2.5.2 Sensores

Sensores são dispositivos sensíveis a algum fenômeno físico-químico, os quais fornecem informações acerca de uma grandeza de interesse ao serem expostos a tal fenômeno. Em geral, sensores são utilizados em aplicações nas quais se deseja mensurar e/ou monitorar características de um sistema. Diversos dispositivos presentes no dia-a-dia das pessoas fazem o uso de sensores, como os termômetros, os alarmes de segurança e os detectores de incêndio (Thomazini e Albuquerque, 2020).

É comum que sensores não forneçam diretamente o valor das grandezas por ele medidas, mas emitam um sinal elétrico de saída que deve ser convertido no valor procurado através de uma relação matemática, como uma fórmula ou uma proporção. O dispositivo responsável por essa conversão é chamado de transdutor.

Dependendo das particularidades de seu sinal de saída, o sensor pode ser classificado como analógico ou digital (Thomazini e Albuquerque, 2020).

Sensores analógicos apresentam como saída um sinal contínuo ao longo do tempo, capaz de representar qualquer valor dentro de uma determinada faixa. Por outro lado, um sensor digital fornece como saída um sinal discreto no tempo, capaz de assumir apenas um conjunto finito de valores (Oppenheim e Willsky, 2010). Enquanto sensores analógicos apresentam a vantagem de oferecer uma quantidade maior de valores de saída, tornando o resultado obtido ligeiramente mais preciso, sensores digitais têm se popularizado devido a fatores como seu baixo custo de fabricação e rápida velocidade de resposta.

Uma representação de sinais analógicos e digitais pode ser verificada na Figura 2.9.

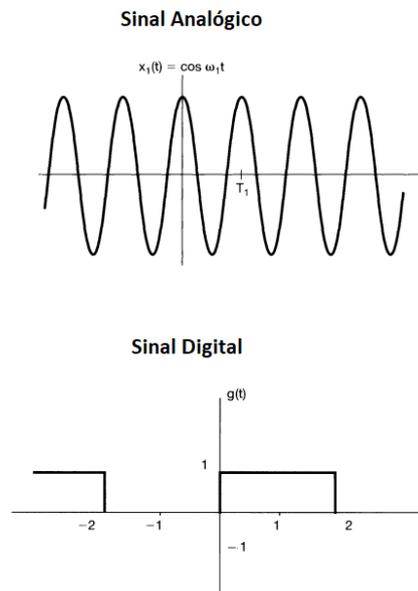


Figura 2.9: Exemplos de um sinal analógico e um digital (Fonte: Adaptado de Oppenheim e Willsky, 2010).

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, será apresentada a metodologia aplicada para a pesquisa do tema e o desenvolvimento do carregador inteligente proposto, incluindo aspectos pertinentes à montagem da estrutura do *hardware* e ao desenvolvimento do *software*. Também será exposta a funcionalidade do aplicativo de monitoramento, sendo discutido acerca das variáveis que deverão ser monitoradas.

De início, foi realizada uma revisão literária de livros e estudos disponíveis de forma gratuita em plataformas *online*, como o Google Acadêmico e a biblioteca virtual do IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos). Através desse processo, buscou-se levantar informações sobre temas relacionados ao projeto proposto, principalmente no que se refere ao estado da arte das baterias de lítio-íon, as metodologias existentes para seu carregamento e técnicas para implementação de comunicações sem fio para monitoramento remoto. No total, foram analisadas aproximadamente 40 fontes distintas, as quais se encontram listadas no final desse trabalho.

Após a pesquisa realizada, foi possível determinar componentes apropriados para o controle do processo de carregamento e o estabelecimento de uma comunicação sem fio, sendo dada prioridade a dispositivos que satisfazem as necessidades do projeto e apresentam baixo custo. Para a implementação do circuito de carga em si, foi optado por usar o TP4056, um circuito integrado capaz de realizar o carregamento de uma bateria Li-Ion em duas etapas, apresentado no Capítulo 2, garantindo

que o processo seja eficiente e seguro. Foi decidido também que seria utilizado um transistor MOSFET de canal p , responsável pelo chaveamento do circuito de carga, ligando-o e desligando-o conforme necessário. No contexto da implementação de comunicação sem fio, foi escolhido o módulo HC-05, capaz de estabelecer comunicação *bluetooth* a uma frequência de aproximadamente 2,4 *GHz*. A escolha desse método de transmissão se deve ao fato de praticamente todo *smartphone* moderno apresentar conectividade *bluetooth*, permitindo que a plataforma de monitoramento seja desenvolvida na forma de um aplicativo para dispositivos móveis.

No que se refere à aquisição de dados e supervisão das características da bateria, foram selecionadas duas variáveis para monitoramento - a tensão e a temperatura. A escolha da tensão foi direta, uma vez que essa grandeza proporciona uma verificação imediata do estado da carga da bateria, permitindo que o usuário determine se ela se encontra carregada ou não. A temperatura, por sua vez, foi escolhida como variável de monitoramento devido ao risco inerente de fuga térmica em baterias de lítio-íon. A partir da checagem constante da temperatura, é possível garantir o desligamento do sistema caso essa variável atinja valores muito altos, mitigando o risco de incêndios e explosões. Em relação à plataforma de monitoramento, optou-se por desenvolvê-la na forma de um aplicativo móvel, através do *software* aberto *App Inventor*. Para o processamento de dados e integração entre os demais componentes do sistema, foi escolhido o microcontrolador *Arduino*, o qual apresenta compatibilidade com todos os dispositivos mencionados.

3.1 Sistema Proposto

O *hardware* e *software* desenvolvidos foram pensados no intuito de implementar um sistema de carregamento inteligente para baterias de lítio-íon, fornecendo informações atualizadas da tensão e da temperatura da bateria ao usuário, através de comunicação sem fio, estabelecida por meio do protocolo *bluetooth*. O sistema deve proporcionar o desligamento automático do circuito de carga quando a bateria estiver completamente carregada ou se a temperatura da mesma superar um nível

de segurança pré-estabelecido. O usuário também deve possuir a capacidade de desligar o carregador de forma remota, caso considere que as informações fornecidas pelos sensores indiquem um comportamento adverso da bateria ou do sistema como um todo.

Na prática, o sistema consiste em dois subsistemas atuando em conjunto - o primeiro, chamado de módulo de carga e sensoriamento, consiste em um dispositivo responsável pelo processo de carga da bateria, aquisição das leituras de tensão e temperatura oriundas dos sensores, processamento dos dados recebidos através do *Arduino*, estabelecimento de comunicação *bluetooth*, para transmissão das informações e desligamento automático do circuito de carga, caso a bateria atinja um critério de parada específico ou seja submetida a altas temperaturas. O segundo subsistema, nomeado aplicativo de monitoramento, recebe as informações oriundas do módulo de carga e sensoriamento, exibindo-as na tela do *smartphone* do usuário, proporcionando que o mesmo supervisione o estado da bateria de forma constante e atualizada.

3.2 Componentes Utilizados

Nesta seção, serão apresentados os componentes utilizados para montagem do *hardware* e programas utilizados para desenvolvimento do *software* do sistema proposto.

3.2.1 Bateria de Litio-Íon 18650

A bateria 18650 é um modelo padrão de baterias Li-Ion lançado no mercado em 1994, tendo se estabelecido como uma das baterias secundárias mais utilizadas no mundo. O código 18650 se refere às dimensões físicas do dispositivo - 18 *mm* de diâmetro, 65 *mm* de diâmetro e formato cilíndrico. As baterias 18650 são partes constituintes de diversos equipamentos eletro-eletrônicos recarregáveis, como *power banks*, veículos elétricos e mini-satélites (Xu et al., 2021).

Devido aos riscos inerentes das baterias de lítio-íon, foram desenvolvidos padrões técnicos para fabricação das baterias 18650, visando mitigar a possibilidade de incêndios e explosões. Alguns dos recursos obrigatórios para todas as baterias 18650 vendidas comercialmente são a presença de um dispositivo de interrupção de corrente (*current interrupt device* - CID) e de um mecanismo para liberação do excesso de pressão interna. Os modelos mais modernos podem contar com outras formas de proteção, como detecção de fuga térmica e a utilização de circuitos integrados para monitoramento ativo do funcionamento da bateria (Xu et al., 2021).

Para o projeto, foi utilizada uma bateria 18650 de 2600 *mAH* fabricada pela *Gimex*, a qual apresenta um circuito integrado que a impede de ser carregada além do limite, além dos dispositivos obrigatórios de proteção. Essa bateria foi escolhida para garantir que os testes do sistema desenvolvido pudessem ocorrer de forma segura, sem riscos significativos. Uma imagem da bateria utilizada pode ser verificada na Figura 3.1.



Figura 3.1: Bateria 18650 de 2600 *mAH*, fabricada pela *Gimex* (Fonte: O autor).

3.2.2 Módulo de Carregamento TP4056

O TP4056 é um circuito integrado desenvolvido pela empresa chinesa *Nanjing Top Power ASIC Corp.*, capaz de efetuar o carregamento de uma bateria Li-Ion 18650, através da metodologia em duas etapas introduzida na seção 2.2.2. Durante a etapa de carregamento constante, o TP4056 pode fornecer até 1A à bateria que está sendo carregada, garantindo um carregamento de 1C para baterias 18650 con-

vencionais de 1000mAh . O dispositivo consegue carregar uma bateria Li-Ion até aproximadamente $4,2\text{V}$, com o carregamento sendo finalizado quando a corrente cai abaixo de um determinado valor, o qual pode ser programado pelo usuário através da conexão de um resistor a um terminal específico do *chip* (NanJing-Corp., 2023).

No projeto desenvolvido, foi utilizada uma versão do TP4056 com circuito de proteção contra sobrecarga, apresentada na Figura 3.2. O componente utilizado apresenta seis pinos, conforme descrito a seguir:

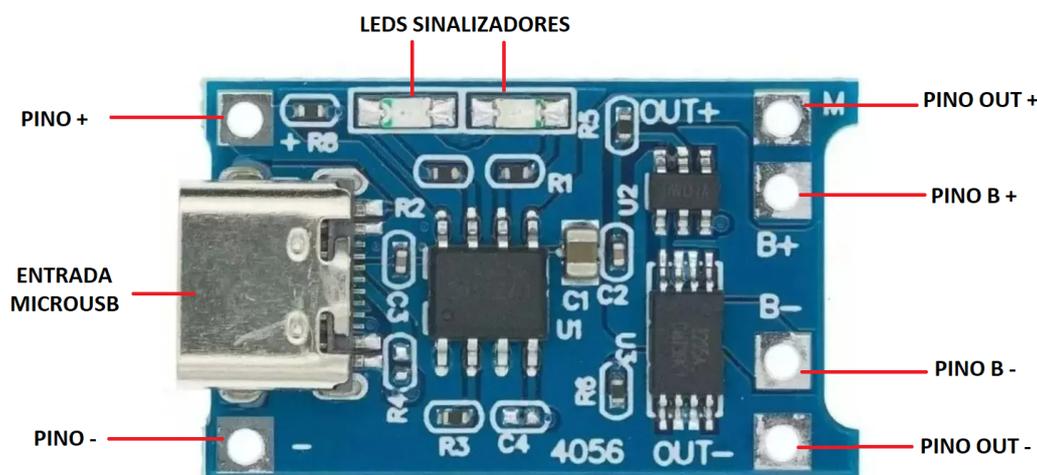


Figura 3.2: Módulo TP4056 com circuito de proteção (Fonte: O autor).

- Pino + : terminal positivo da tensão de alimentação do *chip*;
- Pino - : terminal negativo da tensão de alimentação do *chip*;
- Pino B + : terminal positivo (cátodo) da bateria a ser carregada;
- Pino B - : terminal negativo (ânodo) da bateria a ser carregada;
- Pino OUT + : terminal positivo para conexão de um circuito a ser alimentado pela bateria (não utilizado no projeto);
- Pino OUT - : terminal negativo para conexão de um circuito a ser alimentado pela bateria (não utilizado no projeto).

Essa versão do TP4056 apresenta uma entrada *MicroUSB*, a qual pode ser utilizada para carregamento da bateria no lugar dos pinos + e -, e também dois *LEDs* para indicação da carga da bateria. Quando o TP4056 está energizado e operando, um LED vermelho se acende. No caso do TP4056 estar energizado mas não se encontrar em operação, um LED azul se acende em seu lugar.

O TP4056 foi escolhido para o projeto devido a sua capacidade de otimizar o processo de carga de uma bateria Li-Ion, conforme descrito por Islas et al. (2018). A versão específica utilizada no trabalho, foi selecionada devido à proteção adicional fornecida e pela presença dos LEDs sinalizadores, possibilitando que o sistema desenvolvido fosse testado de forma prática e segura.

3.2.3 *Arduino UNO*

O *Arduino UNO* é uma placa de prototipagem baseada no microcontrolador *ATMega328p*, desenvolvido pela companhia ATMEL. O *Arduino UNO* geralmente opera a uma tensão de 5V, apresentando velocidade de *clock* de 16MHz, 14 pinos digitais de *E/S*, 6 pinos de entrada analógica, memória *flash* de 32KB e *SRAM* de 2KB. Além disso, apresenta pinos dedicados para o estabelecimento de comunicação serial, denominados *Tx* e *Rx* (Arduino, 2023). Uma imagem do *Arduino UNO* pode ser visualizada na Figura 3.3, enquanto um diagrama de seus pinos é apresentado na Figura 3.4.

O *Arduino UNO* é a placa mais popular dentre todos os modelos de *Arduino*, apresentando maior flexibilidade e menor consumo energético, quando comparada a placas menores, como o *Arduino NANO*, e menor custo em comparação a modelos maiores, como o *Arduino MEGA* (Joseph, 2022). Devido a esses fatores, o *Arduino UNO* se mostrou adequado aos propósitos do projeto desenvolvido, tendo sido escolhido como o microcontrolador central para integração e coordenação dos demais componentes do sistema.



Figura 3.3: *Arduino UNO* (Fonte: O autor).

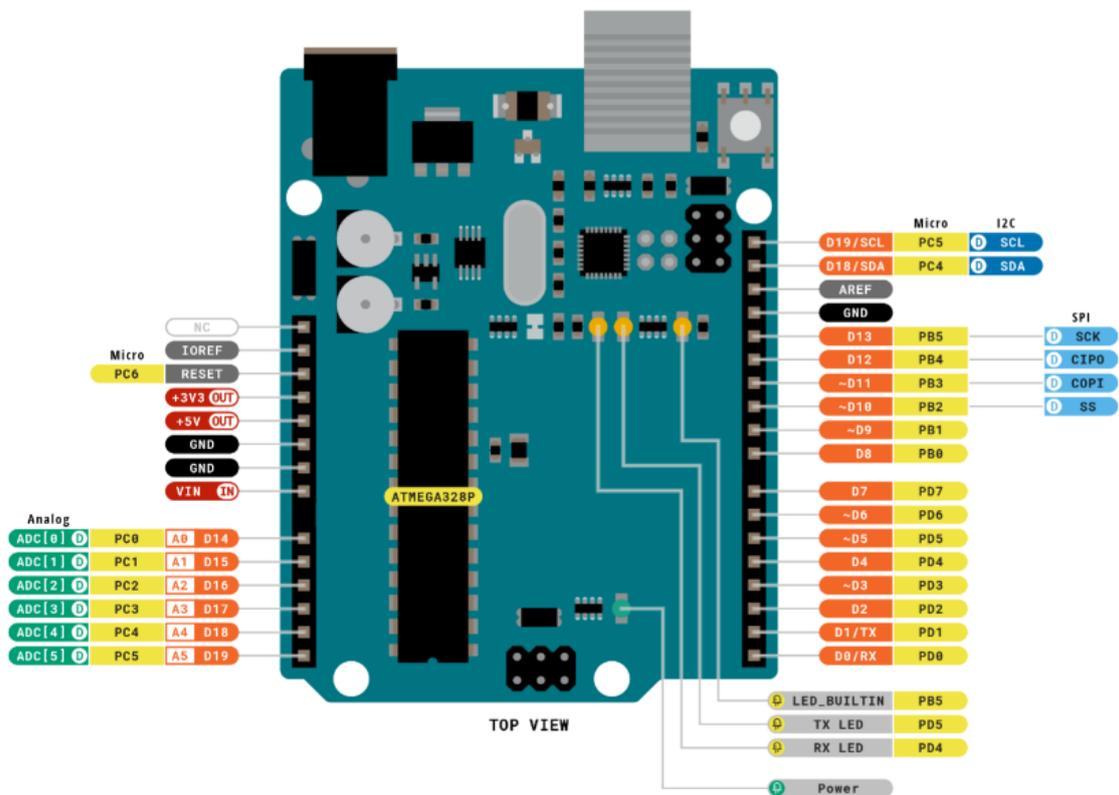


Figura 3.4: Diagrama de pinagem do *Arduino UNO* (Fonte: Arduino, 2023).

3.2.4 Sensor de Tensão

Um sensor de tensão é um dispositivo capaz de medir a diferença de potencial elétrico entre dois terminais (Thomazini e Albuquerque, 2020). No projeto desenvolvido, um sensor desse tipo foi utilizado para verificar a tensão entre os terminais da bateria de Li-Ion ao longo de seu carregamento. O sensor escolhido foi um modelo baseado no conceito de divisão de tensão, o qual funciona com $5V$ e é capaz de medir tensões contínuas de até $25V$. O módulo apresenta baixo custo e pode ser utilizado em conjunto com o *Arduino* de maneira simples, sendo necessário apenas uma conversão de valores para se verificar a leitura obtida (ElectronicsHUB, 2023).

O sensor utilizado, visto na Figura 3.5, apresenta cinco pinos. Os pinos V_{cc} e GND são conectados aos terminais cuja diferença de potencial (tensão) se deseja medir, enquanto o pino S atua como a saída do sensor, fornecendo o sinal que deve ser processado para obtenção do valor de tensão medido. O pino -, por sua vez, é o pino da tensão de referência do dispositivo, o qual deve ser conectado ao terra. Por fim, tem-se o pino +, o qual permanece desconectado.

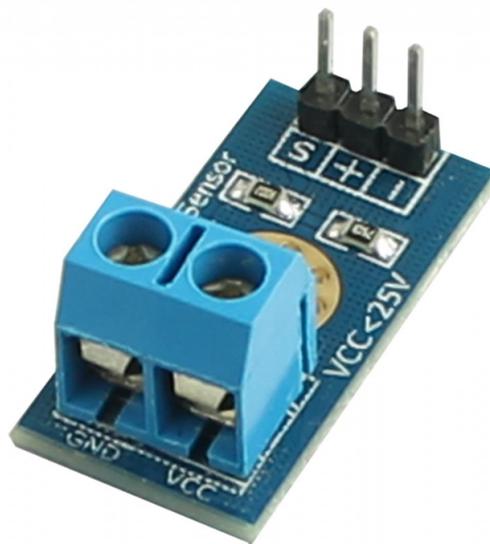


Figura 3.5: Sensor de tensão de $25 V_{cc}$ (Fonte: O autor).

Internamente, o sensor apresenta dois resistores em série, um de $30 k\Omega$ e um de $7,5k\Omega$, dispostos conforme a Figura 3.6. Através da Figura 3.6, é possível perceber que a tensão de saída do módulo é igual à tensão entre os terminais do resistor de

$7,5k\Omega$. Como os resistores se encontram em série, tem-se uma resistência equivalente entre V_{cc} e GND de $30k\Omega + 7,5k\Omega = 37,5k\Omega$. Sabendo que $7,5k\Omega$ é $1/5$ de $37,5k\Omega$, a tensão de saída será $1/5$ da tensão entre V_{cc} e GND . Considerando que o *Arduino UNO* consegue lidar com tensões de até $5V$, o sensor poderia ser utilizado para a leitura de tensões de até 5 vezes esse valor, isto é, $25V$.

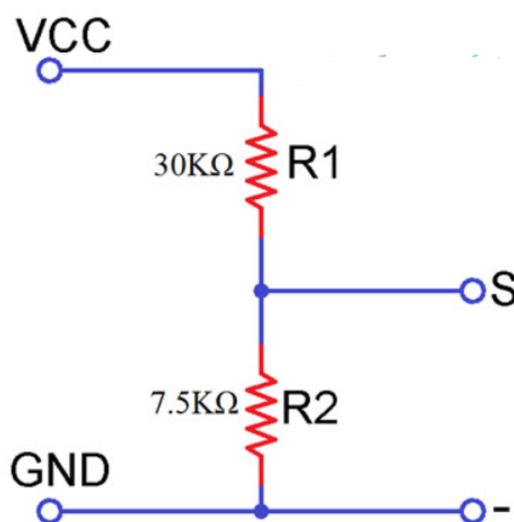


Figura 3.6: Circuito interno do sensor de tensão (Fonte: ElectronicsHUB, 2023).

3.2.5 Sensor de temperatura LM35

A LM35 é uma família de sensores desenvolvido pela *Texas Instruments*, capaz de medir temperaturas entre $-55^{\circ}C$ e $150^{\circ}C$, fornecendo uma tensão proporcional à temperatura medida. O dispositivo funciona com base em conceitos de eletrônica do estado sólido, sendo constituído internamente por um circuito que apresenta um diodo conectado aos emissores de dois transistores. Quando a temperatura sobre a junção do diodo aumenta, a queda de tensão entre seus terminais se altera de maneira proporcional, gerando um sinal que é amplificado e encaminhado para o terminal de saída do sensor (Texas-Instruments, 2017).

Para o projeto, foi utilizado o sensor padrão da família LM35, o qual apresenta o mesmo nome de sua família. Conforme pode ser verificado na FIGURA 3.7, o LM35

apresenta apenas três terminais - V_{cc} (terminal de alimentação), GND (terminal de terra) e OUT (terminal de saída). O sinal fornecido pelo terminal de saída é diretamente proporcional à temperatura detectada pelo mesmo, com a tensão aumentando em aproximadamente 10 mV a cada grau Celsius medido. Algumas características do sensor podem ser verificadas na Tabela 3.2.

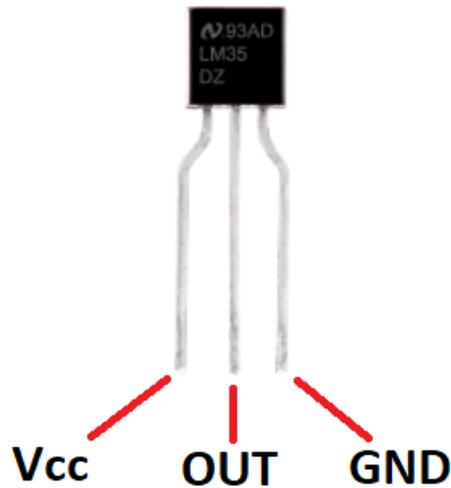


Figura 3.7: Sensor de temperatura LM35 (Fonte: O autor).

Tensão de alimentação	4 a 30 V
Faixa de operação	-55 a 150 °C
Faixa de sensibilidade	9,8 a 10 mV/°C
Precisão	±0,8 °C

Tabela 3.1: Características do sensor LM35 (Fonte: O autor).

No contexto do sistema desenvolvido, o sensor foi empregado para monitorar a temperatura sobre a bateria de lítio-íon submetida ao processo de carga, visto que a exposição a altas temperaturas pode provocar fuga térmica e, conseqüentemente, a explosão da bateria (Chakraborty et al., 2019).

3.2.6 Transistor MOSFET IRF9540

O transistor IRF9540 é um transistor do tipo MOSFET de canal p , desenvolvido pela *Vishay Siliconix*. O dispositivo suporta correntes elétricas de até 19A de módulo em temperatura ambiente e consegue dissipar até 50W de potência, tornando-o ideal

para aplicações que envolvem correntes razoavelmente elevadas para os padrões de um circuito eletrônico, como é o caso de um circuito de carregamento de baterias (Vishay-Siliconix, 2021).

No projeto, o transistor foi utilizado como um *switch*, a fim de desconectar a alimentação do módulo TP4056, caso ocorra algum evento que exija a desenergização do carregador. Embora o módulo TP4056 utilizado já desligue por si só quando detecta que a bateria está carregada, o MOSFET possibilita que o sistema seja programado de forma a interromper o fluxo de corrente mediante comando ou caso a temperatura da bateria atinja valores acima de um limiar de segurança, preservando sua integridade e garantindo a segurança do sistema e do usuário. O componente utilizado pode ser visualizado na Figura 3.8.

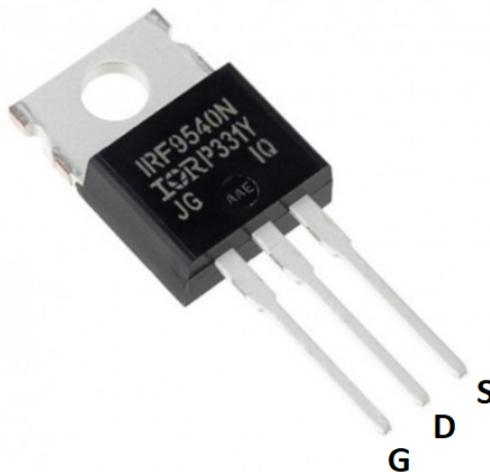


Figura 3.8: Transistor IRF9540N (Fonte: O autor).

A razão pela qual se escolheu um MOSFET de canal p em vez dos mais populares MOSFETs de canal n se deve ao fato de que, através da utilização de um PMOS, é possível manter a tensão da fonte (V_s) fixa, garantindo a condução de corrente quando a chave estiver fechada (Vishay-Siliconix, 1997). Como no projeto o *switch* (MOSFET) está posicionado entre a fonte e a carga, a condução não seria garantida por um MOSFET de canal n , visto que o terminal fonte (S) estaria conectado à carga e, portanto, teria seu valor de tensão alterado quando o sistema fosse ligado e/ou desligado. No caso do MOSFET de canal p , o terminal S é ligado diretamente

à fonte de 5 V, mantendo seu valor constante. Essa diferença entre o funcionamento do circuito com um NMOS e um PMOS está representada na Figura 3.9.

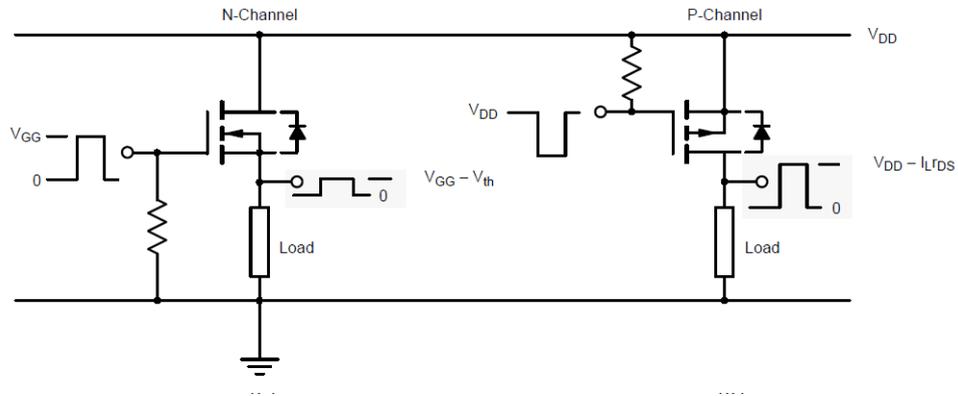


Figura 3.9: Comparação da utilização de um NMOS e um PMOS como *switches* entre a fonte de alimentação e a carga (Fonte: Vishay-Siliconix, 1997).

3.2.7 Módulo *Bluetooth* HC-05

O módulo HC-05 é um componente capaz de estabelecer uma conexão *bluetooth* V2.0 de forma fácil e barata, permitindo a comunicação com um ou mais dispositivos. O dispositivo apresenta a capacidade de atuar como mestre ou escravo e apresenta interface *UART* integrada, permitindo a transmissão de dados através de comunicação serial (Yepez-López et al., 2019). Uma foto do HC-05 pode ser visualizada na Figura 3.10.

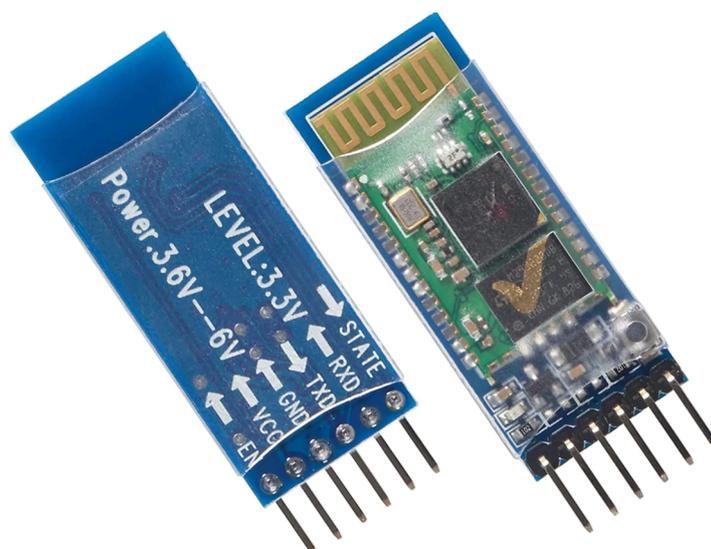


Figura 3.10: Módulo *bluetooth* HC-05 (Fonte: O autor).

O HC-05 apresenta seis pinos, cuja funcionalidade está descrita a seguir:

- *EN*: pino responsável por definir o modo de funcionamento do módulo entre transferência de dados e fornecimento de comandos. O primeiro modo é habilitado com um valor lógico de 0 (*LOW*), enquanto o segundo com um valor lógico de 1 (*HIGH*).
- V_{cc} : pino de alimentação do módulo, destinado à conexão com uma fonte de 5V;
- *GND*: pino de terra do módulo;
- *TXD*: pino para transmissão serial de dados recebidos via *bluetooth*;
- *RXD*: pino que recebe informação via serial para transmissão via *bluetooth*;
- *State*: pino que indica o modo de funcionamento do módulo.

No contexto do sistema desenvolvido, o HC-05 foi utilizado para estabelecer uma conexão entre o *Arduino UNO* e um telefone celular, criando um canal responsável pela transmissão dos dados adquiridos dos sensores para o sistema de monitoramento, bem como a execução de comandos por parte do usuário.

3.2.8 Software App Inventor

O *App Inventor* é uma linguagem de programação de caráter visual, originada através de uma parceria entre o *Google* e o *MIT*, a qual se destina ao desenvolvimento de aplicativos para dispositivos móveis de sistema operacional *Android*. O ambiente de desenvolvimento do *App Inventor* é baseado em blocos, propiciando uma interface amigável para estudantes e programadores iniciantes. No entanto, apesar de sua simplicidade, o *App Inventor* permite a criação de aplicações com funcionalidades mais complexas, como comunicação com a *web*, interação com sensores e reconhecimento de fala (Gomes e Melo, 2013).

O desenvolvimento de aplicativos por meio do *App Inventor* ocorre através do navegador, em duas janelas diferentes - *App Designer* e *Blocks Editor*. A janela *App Designer*, apresentada na Figura 3.11, é utilizada para construir a interface gráfica da aplicação com o usuário. No centro dessa janela, há uma representação da tela de um dispositivo móvel, chamada de *viewer*, para onde são arrastados diversos componentes como botões, caixas de texto, figuras, entre outros.

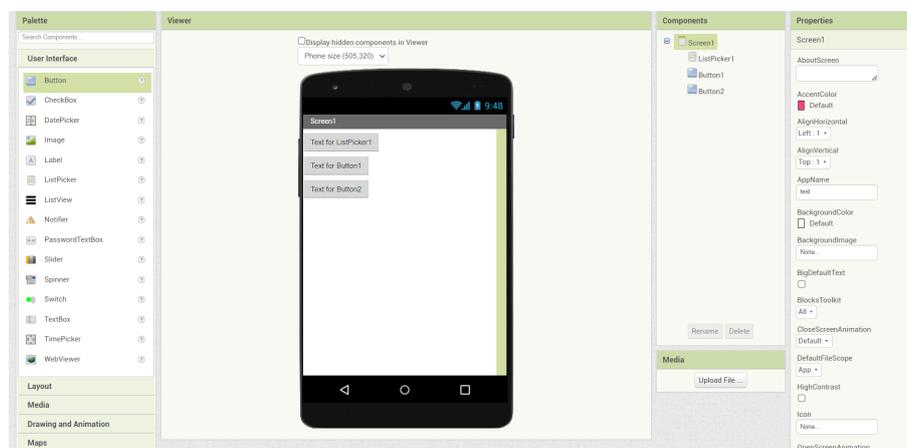


Figura 3.11: Janela *App Designer* do *App Inventor* (Fonte: O autor).

A janela *Blocks Editor*, por outro lado, é onde se define o comportamento de todos os componentes posicionados no *viewer*. Nessa janela, apresentada na Figura 3.12, o programador posiciona blocos conectáveis, os quais definem eventos, operações algébricas e ações de controle a serem realizados pelos componentes do *viewer*. Através do *blocks editor*, também é possível testar o aplicativo diretamente

através de um emulador ou de um dispositivo *Android* conectado à instância executada do *App Inventor*.

Para o sistema desenvolvido, o *App Inventor* foi utilizado para criar o sistema de monitoramento e controle do circuito de carregamento de baterias de Li-Ion, sendo elaborada uma interface simples, através da qual é possível visualizar a tensão da bateria que está sendo carregada, bem como verificar se a carga foi finalizada ou interrompida, em decorrência de altas temperaturas. A recepção dessas informações é feita através de uma conexão entre o dispositivo móvel e o módulo *bluetooth* HC-05, também configurado por meio da aplicação desenvolvida no *App Inventor*.

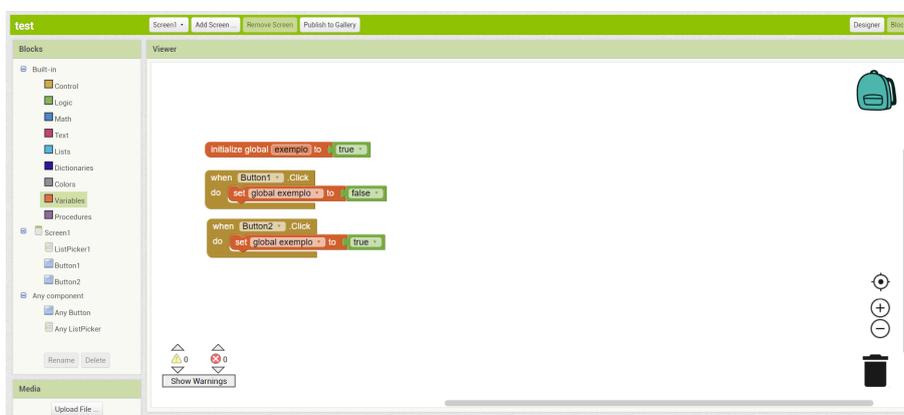


Figura 3.12: Janela *Blocks Editor* do *App Inventor* (Fonte: O autor).

Capítulo 4

Desenvolvimento

Neste capítulo, será detalhado o processo de desenvolvimento, montagem e implementação do sistema de carregamento inteligente proposto. Conforme mencionado anteriormente, o projeto foi separado em dois subsistemas - o módulo de carga e sensoriamento e o aplicativo de monitoramento. Os dois subsistemas atuam em conjunto para realizar o carregamento de uma bateria Li-Ion, adquirir dados de tensão e temperatura, transmitir informações relevantes ao usuário e atuar de forma automática para garantir a integridade da bateria.

4.1 Módulo de Carga e Sensoriamento

O módulo de carga e sensoriamento engloba tanto a parte física do carregador de baterias (*hardware*) quanto o *software* implementado em *Arduino*, o qual é responsável pela aquisição, processamento e transmissão das informações obtidas dos sensores, bem como pelo controle do chaveamento, implementado por meio de um transistor MOSFET. Os detalhes do desenvolvimento do *hardware* e do *software* foram separados em duas subseções, as quais são apresentadas a seguir.

4.1.1 *Hardware*

O *hardware* elaborado para o sistema de carregamento é constituído pelo *Arduino UNO*, o TP4056, o MOSFET IRF9540, o HC-05, o LM35 e o sensor de tensão. O

Arduino age como o dispositivo central do sistema, uma vez que ele é o responsável pelo processamento de dados e controle do carregador como um todo, realizando a integração entre os demais componentes. O TP4056 é o *chip* responsável por executar a principal função do sistema, carregar uma bateria de lítio-íon de forma controlada. O MOSFET é utilizado como uma chave de seccionamento, para impedir a continuidade do carregamento sob demanda ou em caso de emergência. O LM35 e o sensor de tensão, por sua vez, são responsáveis por adquirir dados da bateria que está sendo carregada, os quais serão transmitidos ao aplicativo de monitoramento pelo HC-05. Na Figura 4.1, é possível visualizar uma representação do protótipo do módulo de carga e sensoriamento em uma *protoboard*, enquanto a Figura 4.2. demonstra um diagrama das interligações entre os componentes.

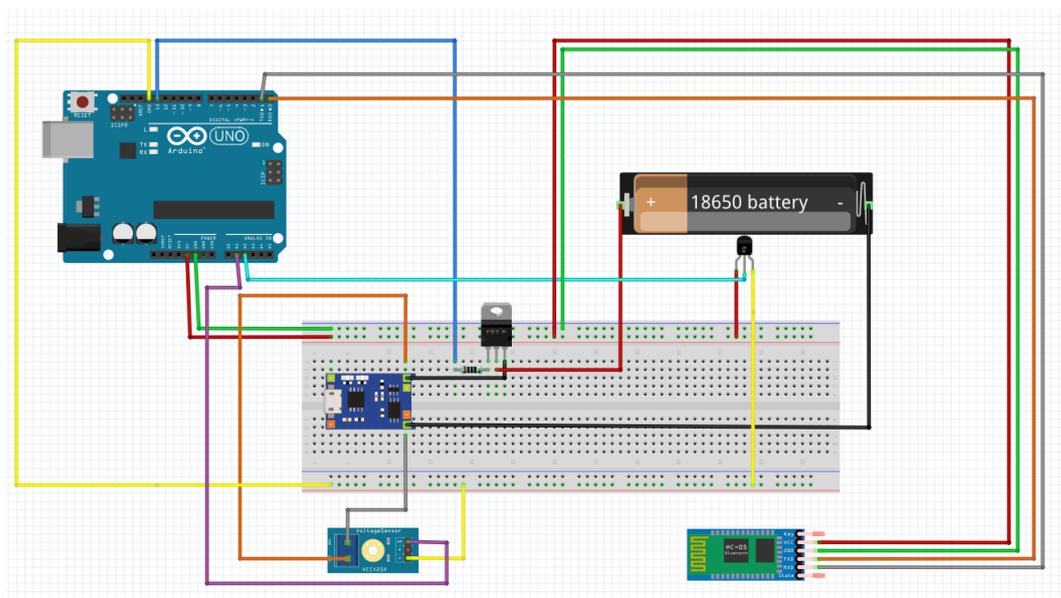


Figura 4.1: Representação do protótipo do módulo de carga e sensoriamento (Fonte: O autor).

Conforme pode ser visualizado na Figura 4.1, o sensor de temperatura e o módulo *bluetooth* são alimentados pelo pino de 5V do Arduino. O módulo TP4056, por outro lado, é alimentado através de sua entrada *MicroUSB*, uma vez que a alimentação direta por meio do *Arduino* poderia limitar em demasia a corrente fornecida ao módulo e, conseqüentemente, tornar o processo de carga da bateria mais lento. O pino B+ do TP4056 é conectado ao pino da fonte (S) do MOSFET, enquanto o pino de dreno (D) é conectado ao terminal positivo (cátodo) da bateria. O terminal

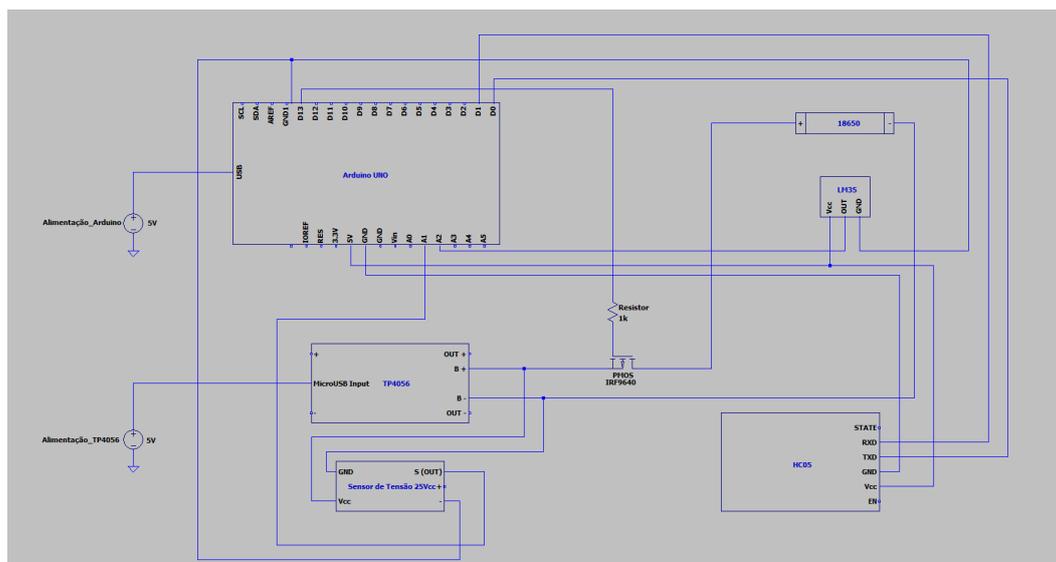


Figura 4.2: Esquema de interligação entre componentes do módulo de carga e sensoriamento (Fonte: O autor).

negativo (ânodo) é conectado ao pino B- do TP4056, fechando o circuito de carga.

O pino da porta (G) do MOSFET se encontra indiretamente conectado ao pino D13 do *Arduino*, de forma a possibilitar o controle da passagem de corrente mediante a aplicação de uma tensão no terminal. Entre os pinos há a presença de um resistor de $1k\Omega$, o qual atua como um resistor de proteção contra altas correntes.

Os terminais V_{cc} e GND do sensor de tensão, são conectados, respectivamente, aos terminais B+ e B- do TP4056, possibilitando a medição da tensão entre esses terminais e, conseqüentemente, a tensão sobre a bateria durante o carregamento, visto que durante o processo de carga o MOSFET estará saturado e a queda de tensão entre os terminais S e D será praticamente negligível. O terminal de saída do sensor de tensão está conectado ao pino A1 do *Arduino*, visto que o sinal fornecido pelo sensor é de natureza analógica.

O sensor LM35 encontra-se posicionado de forma bastante próxima da bateria, a fim de promover uma leitura adequada da temperatura da bateria durante o processo de carga. O terminal de saída do componente se encontra conectado ao pino A2 do *Arduino*, uma vez que o sinal fornecido pelo LM35 também é de natureza analógica. O terminal GND de ambos os sensores se encontra conectado a um pino GND dedicado do *Arduino*, buscando eliminar interferências eletromagnéticas e criando

condições para uma leitura adequada das informações obtidas.

Por fim, o módulo *bluetooth* HC-05, se encontra conectado aos pinos *Tx* e *Rx* do *Arduino*, possibilitando a transmissão dos dados obtidos pelos sensores de tensão e corrente para o módulo, através de sua interface serial *UART* e, em seguida, a transmissão desses mesmos dados do módulo para o aplicativo de monitoramento, via *bluetooth*. Para realizar a conexão de forma adequada, os pinos *Tx* e *Rx* do *Arduino* foram interligados aos pinos *RXD* e *TXD* do HC-05, respectivamente.

A Figura 4.3. apresenta o protótipo físico do *hardware* do módulo de carga e sensoriamento, montado em uma *protoboard*.

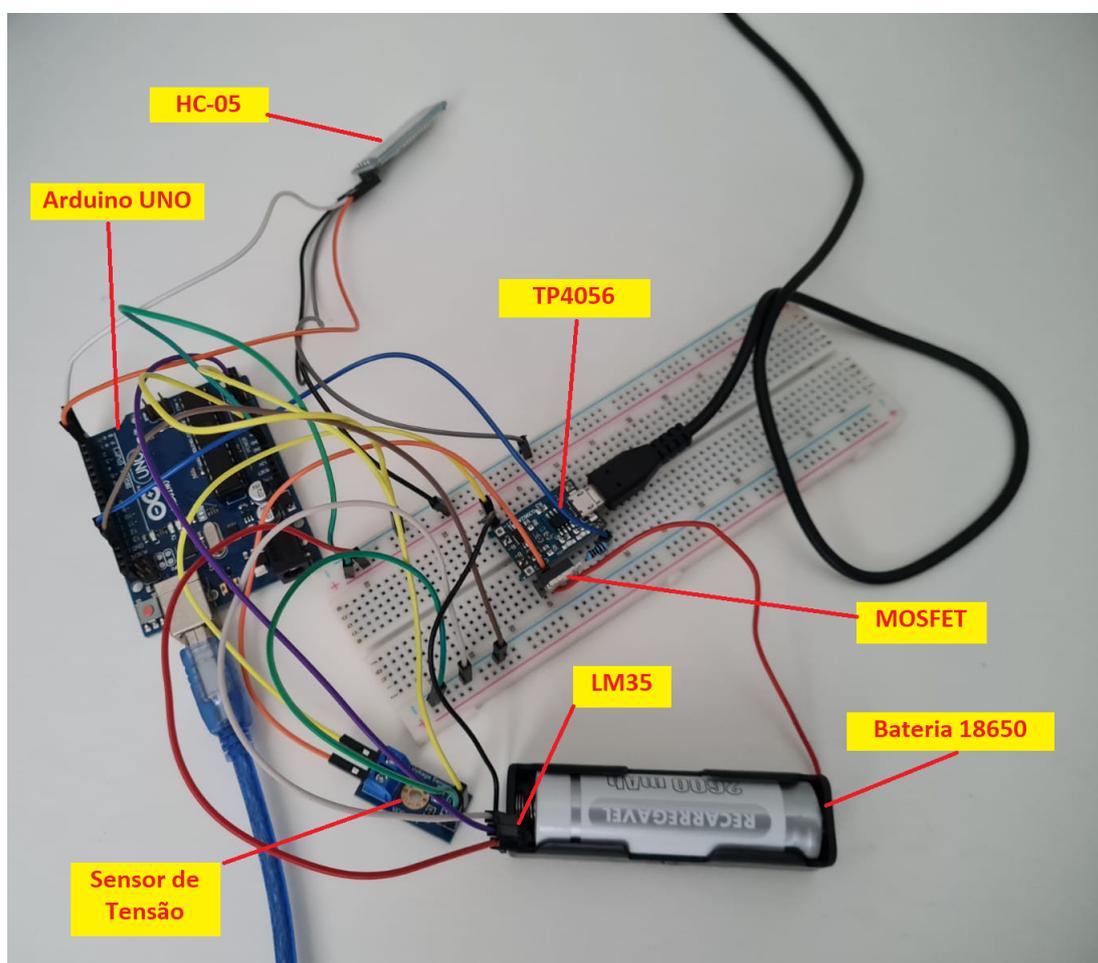


Figura 4.3: Protótipo físico do módulo de carga e sensoriamento (Fonte: O autor).

4.1.2 *Software*

O *software* do módulo de carga e sensoriamento foi desenvolvido através da IDE do *Arduino*, sendo programado para realizar a aquisição periódica de informações dos sensores de tensão e temperatura, transmissão de dados ao módulo de monitoramento, verificação dos critérios de interrupção e parada do processo de carga, e controle dos componentes do sistema de uma forma geral. O funcionamento do módulo se baseia na execução repetitiva de uma sequência de passos, até que a bateria se encontre carregada ou algum outro fator exija o desligamento do circuito de carga. Um fluxograma sintetizando esse processo pode ser verificado na Figura 4.4.

Quando o módulo é energizado, o *Arduino* inicializa uma série de variáveis necessárias para a execução das funcionalidades do código e define quais pinos serão utilizados como *input* e *output*. Além disso, a interface serial *UART* do *Arduino* é iniciada, sendo utilizada uma taxa *baud* (*baud rate*) padrão de 9600 *baud*. Como a transferência de dados ao módulo de monitoramento não ocorre constantemente, sendo realizada em intervalos de alguns minutos, a taxa padrão é mais do que suficiente para garantir uma boa velocidade para envio de informações.

Quando o programa é inicializado, o pino do *Arduino* conectado ao terminal *G* do *MOSFET* é declarado como um *input* LOW, fornecendo uma tensão de 0 V ao transistor. Como esse *MOSFET* é de canal *p*, isso faz com que o dispositivo entre em estado de saturação, passando a conduzir corrente entre seus outros dois terminais. Dessa forma, o circuito de carga com o TP4056 é fechado, dando início ao processo de carregamento da bateria de Li-Ion.

Enquanto o TP4056 realiza a carga, o *Arduino* passa a fazer uma série de verificações no intuito de definir a próxima ação a ser tomada pelo sistema. A primeira dessas verificações é checar se o módulo de monitoramento enviou um comando solicitando o desligamento do circuito de carga. Para tal, utiliza-se os métodos *Serial.available()* e *Serial.read()* do *Arduino*, a fim de checar se há alguma informação disponível na porta serial do microcontrolador e executar sua leitura, respectivamente. Caso a mensagem recebida seja a palavra *OFF* (“desligado”, em inglês),

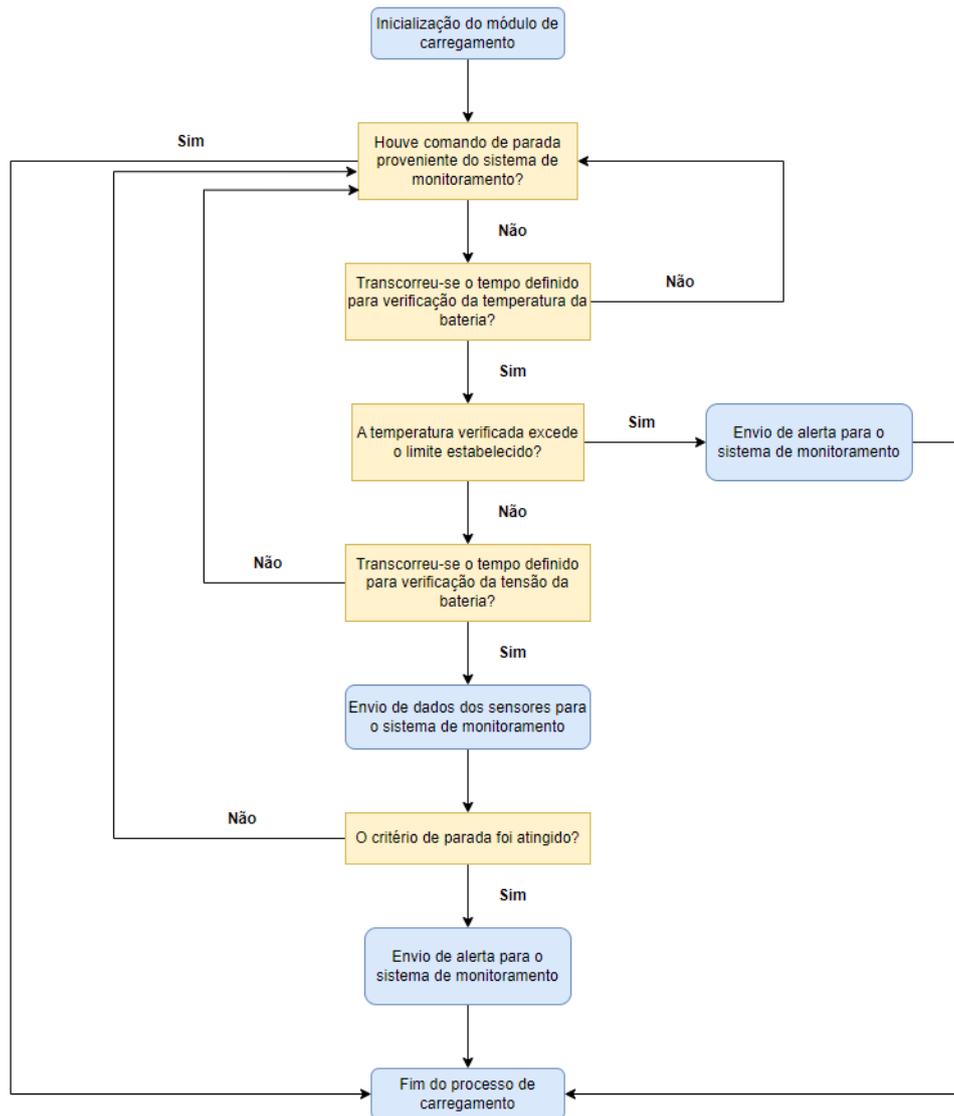


Figura 4.4: Fluxograma de funcionamento do módulo de carga e sensoriamento (Fonte: O autor).

o *Arduino* irá alterar o valor do pino conectado ao *gate* do MOSFET para HIGH (5V), efetivamente desligando o circuito de carga. Além disso, uma *flag* chamada de *EndFlag* é acionada, de forma a interromper as verificações do módulo de carga e sensoriamento.

Se o *Arduino* não receber a mensagem de desligamento proveniente do módulo de monitoramento, o sistema deve decidir se prossegue para a etapa de verificação da temperatura da bateria ou se volta a checar o recebimento de mensagens pela porta serial. Essa decisão é realizada com base no tempo transcorrido desde a última

verificação da temperatura, através das variáveis *LastTempCheckTime*, *CurrentTime* e *TempCheckInterval*.

A variável *LastTempCheckTime* armazena a informação sobre o instante em que *Arduino* executou a última verificação de temperatura, sendo declarada com o valor de 0 na inicialização do programa e atualizada sempre que a verificação chega ao fim. A variável *CurrentTime* armazena a informação do instante de tempo atual do sistema, sendo atualizada logo antes de ser comparada à variável *LastTempCheckTime*. Por fim, a variável *TempCheckInterval* estabelece o intervalo de tempo mínimo entre verificações de temperatura, sendo definida como 5 segundos para garantir o monitoramento constante da temperatura da bateria.

Quando a diferença entre *CurrentTime* e *LastTempCheckTime* é maior que o valor de *TempCheckInterval*, o *Arduino* adquire 20 leituras do sensor LM35 a uma frequência de 200Hz e tira uma média delas, obtendo um valor de temperatura mais preciso e condizente com o estado da bateria. Para a aquisição das leituras, faz-se o uso da função *AnalogRead()* do *Arduino*, visto que o LM35 é um sensor que fornece um sinal de saída analógico. Cada valor obtido por essa função é oriundo do ADC (*Analog to Digital Converter*, ou Conversor Analógico-Digital) do *Arduino*, sendo apresentado como um número entre 0 e 1023, dependendo de qual das 1024 “faixas” entre 0 e 5V o valor lido pelo ADC se encontra. Dessa forma, todo valor de tensão obtido pela *AnalogRead()* é convertido primeiramente para um valor entre 0 e 5V e, em seguida, convertido para o valor de temperatura correspondente, conforme o *datasheet* do LM35.

A média de temperaturas obtida ao fim dessa etapa é, então, comparada com um valor de referência. Caso o valor de referência seja ultrapassado, o módulo considera que há um excesso de temperatura na bateria que está sendo carregada, interrompendo a condução de corrente pelo *MOSFET*, acionando a *flag* de finalização do módulo (*EndFlag*) e escrevendo um sinal de alerta na porta serial, o qual será encaminhado ao módulo de monitoramento, através da comunicação *bluetooth* estabelecida pelo HC-05. O valor de referência foi definido com base no estudo de

Lyu et al. (2020), o qual afirma que a exposição de uma bateria Li-Ion a temperaturas acima de $40^{\circ}C$ pode provocar reações indesejáveis, deteriorando-a e reduzindo seu tempo de vida útil.

Caso a verificação da temperatura resulte em um valor dentro dos parâmetros normais, o sistema checa se deve realizar a etapa de verificação de tensão. Essa checagem ocorre de forma análoga à realizada para decidir se o sistema entrará na fase de verificação de temperatura. Nesse caso, são utilizadas as variáveis *LastVoltCheckTime*, *VoltCheckInterval* e *CurrentTime*, com a primeira e a segunda desempenhando papéis similares aos das variáveis *LastTempCheckTime* e *TempCheckInterval*, respectivamente. Diferentemente da medição de temperatura, a medição de tensão não está diretamente associada à segurança do sistema, de forma que o intervalo entre as verificações de tensão foi escolhido como sendo de 1 minuto, proporcionando um acompanhamento do processo de carga da bateria lento, do ponto de vista computacional, mas rápido o suficiente para manter o usuário atualizado sobre seu andamento.

A obtenção da tensão sobre a bateria também ocorre de forma análoga à obtenção da temperatura, com o *Arduino* obtendo em sequência 20 valores do ADC, relativos ao sinal de saída do sensor de tensão. Similarmente, cada um desses valores é convertido para um valor entre 0 e 5 V e, em seguida, para o valor de tensão correspondente. Ao final desse processo, é feita a média entre os valores adquiridos do sensor, resultando em um valor mais aproximado da tensão real entre os terminais da bateria.

Após a verificação da tensão atual, o seu valor correspondente e o último valor de temperatura obtido, são concatenados em uma *string*, a qual é escrita na porta serial do *Arduino*, sendo repassada ao aplicativo de monitoramento. Dessa forma, o usuário do sistema será atualizado a cada minuto, com informações sobre a tensão e temperatura da bateria, podendo verificar a evolução da carga e monitorar as condições de segurança do carregador.

A última verificação executada pelo *Arduino* é se o carregamento foi finalizado.

Esse processo é realizado com o auxílio das variáveis *MaxVolt* e *ChargeEndCounter*. A variável *MaxVolt* armazena o maior valor da tensão entre os terminais da bateria encontrado até o momento, sendo atualizado sempre que a etapa de aquisição de dados do sensor de tensão se encerra. Quando o seu valor não aumenta após uma nova verificação de tensão, isto é, quando a tensão sobre a bateria não aumenta entre uma verificação e a outra, o contador *ChargeEndCounter* tem seu valor acrescentado em 1. Se o valor de *MaxVolt* superar 4,1 V e o contador atingir o valor de 10, o sistema considera que o carregamento encontra-se finalizado, uma vez que a bateria se aproximou suficientemente da tensão máxima segura de uma bateria de Li-Ion (4,2 V). O valor de *ChargeEndCounter* é resetado sempre que *MaxVolt* aumenta, de forma a garantir que a bateria passe um certo tempo sem apresentar mudanças em sua tensão, antes de se determinar que ela se encontra carregada.

Se o critério de parada do carregamento for atingido, o *Arduino* envia um sinal para que o *MOSFET* deixe de conduzir, a *flag* de finalização do módulo é acionada e uma mensagem é encaminhada ao módulo de monitoramento informando que o carregamento foi finalizado. Caso o critério de parada não seja alcançado, o *software* retornará à etapa de verificação de recebimento de mensagens provenientes do módulo de monitoramento, reiniciando toda a sequência de verificações.

4.2 Aplicativo de Monitoramento

O aplicativo de monitoramento possui a função de apresentar os dados provenientes dos sensores de tensão e temperatura ao usuário do carregador de baterias, possibilitando que ele acompanhe o andamento do processo de carga através de seu *smartphone*. O sistema também alerta o usuário quando o sistema para de fornecer corrente à bateria, além de permitir o desligamento do circuito de carga de forma remota.

O desenvolvimento do aplicativo foi realizado com base no esquema apresentado na Figura 4.5, indicando quais informações ele deve ser capaz de receber e enviar. De forma sintética, o programa aguarda um comando do usuário para ini-

ciar o monitoramento e, após esse comando ser dado, passa a exibir em sua tela os dados obtidos dos sensores de tensão e temperatura, atualizados a cada minuto via *bluetooth*. Quando o circuito de carga tem sua atividade interrompida por conta do excesso de temperatura ou pelo critério de parada ter sido atingido, um aviso aparece na tela para alertar o usuário do acontecido. Por fim, o sistema apresenta um botão dedicado que encaminha um sinal de comando ao *Arduino*, encerrando o funcionamento do sistema de carga e sensoriamento.

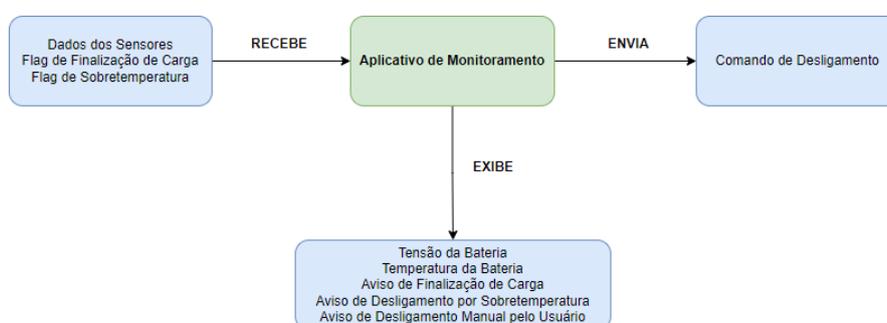


Figura 4.5: Representação do funcionamento do aplicativo de monitoramento (Fonte: O autor).

A implementação do aplicativo de monitoramento foi realizada através do *App Inventor*, sendo o *layout* da tela do aplicativo apresentada na Figura 4.6. É possível verificar que a aplicação apresenta quatro botões, cada qual com uma funcionalidade distinta. O botão “Parear Dispositivo *Bluetooth*” faz com que uma lista de dispositivos *bluetooth* disponíveis seja exibida na tela e possibilita que o *smartphone* seja pareado com o HC-05, componente utilizado para estabelecer uma comunicação sem fio com o *Arduino*. O botão “Iniciar Monitoramento” permite que o sistema passe a receber os dados oriundos do *Arduino* por meio da comunicação estabelecida pelo HC-05, exibindo-os em tela. Em contrapartida, o botão “Encerrar Monitoramento” dá fim a esse processo. Por fim, o botão “Desligar Carregador” encaminha um sinal ao *Arduino* para que o pino *gate* do MOSFET seja alimentado com 5V, interrom-

pendo o processo de carga da bateria.

Internamente, o recebimento de dados pelo aplicativo de monitoramento é iniciado após o botão “Iniciar Monitoramento” ser acionado. Quando isso ocorre, um *clock* com período de *500ms* é ativado. Sempre que há uma borda de subida do *clock*, o *software* invoca um método que verifica se há *bytes* advindos do HC-05 disponíveis para leitura, salvando a informação em caso positivo. Em seguida, verifica-se se a mensagem (*flag*) recebida é “T” (alerta de excesso de temperatura) ou “E” (alerta de finalização do carregamento). Quando um desses alertas é recebido, uma mensagem correspondente é apresentada na tela e o *clock* é desativado. No caso da informação recebida não ser um alerta, isso significa que o aplicativo de monitoramento recebeu uma *string* com os dados dos sensores separados por uma vírgula, na forma “(Tensão, Temperatura)”. Dessa forma, a *string* é tratada e separada a partir da vírgula em dois valores distintos, os quais são então exibidos na tela do aplicativo.

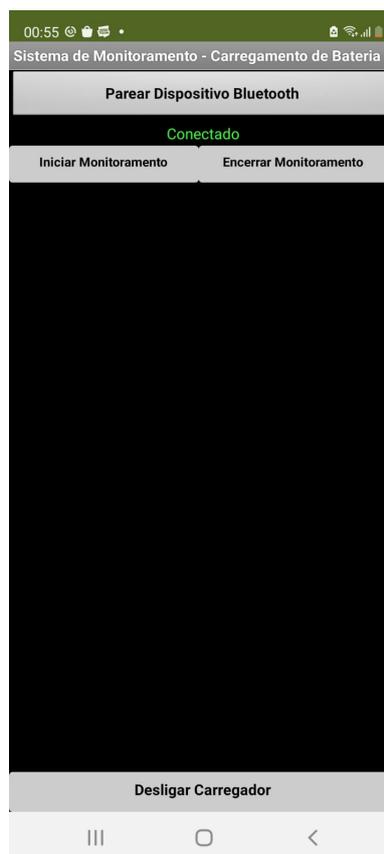


Figura 4.6: *Layout* da tela do aplicativo de monitoramento (Fonte: O autor).

Capítulo 5

Resultados e Síntese

De maneira geral, a implementação real de um sistema envolvendo circuitos eletrônicos, produz resultados que divergem, em certo grau, daqueles esperados teoricamente ou obtidos a partir de simulações computacionais. Isso se deve principalmente ao fato de análises teóricas e simulações se basearem em modelos ideais ou aproximados, não levando em consideração todos os múltiplos fatores que podem influenciar no funcionamento do sistema. Dessa forma, torna-se primordial a análise crítica dos resultados obtidos na prática, a fim de avaliar se eles se aproximam suficientemente do que era esperado.

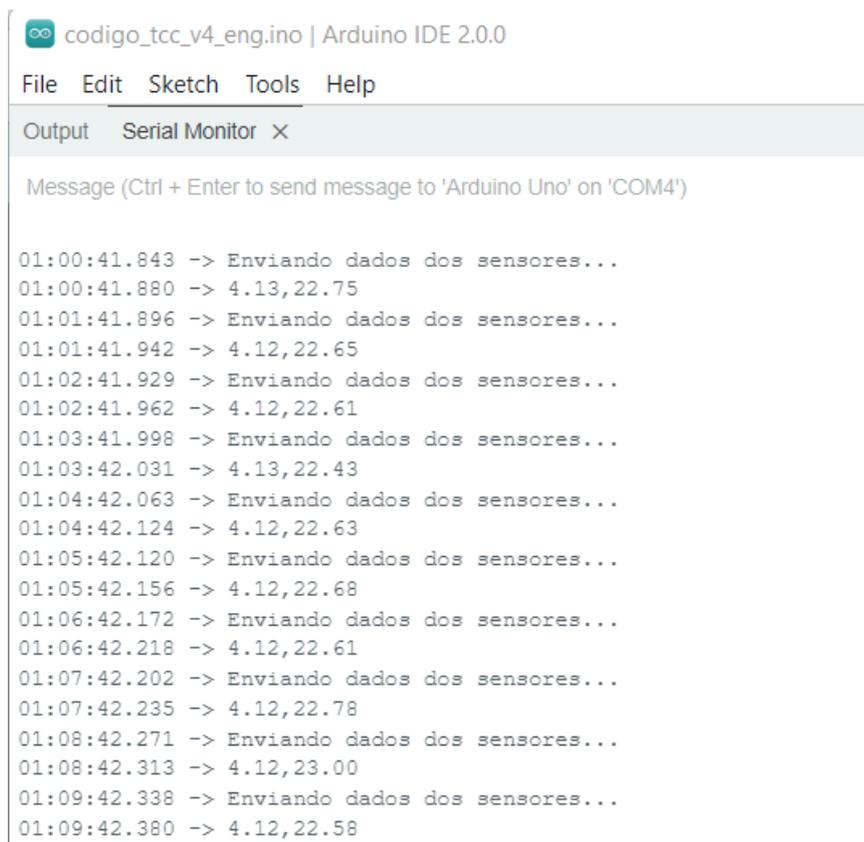
No contexto do projeto apresentado, após o desenvolvimento e implementação do sistema de carregamento como um todo, foram realizados testes para verificação individual de suas funcionalidades, sendo gerados registros (*logs*) para avaliação. Nesse processo, foi possível checar as funções de transmissão de dados, desligamento sob demanda, desligamento automático por excesso de temperatura e desligamento automático por finalização do carregamento. Posteriormente, o sistema foi utilizado para carregar uma bateria de lítio-íon até seu estado de carga total, sendo gerado um gráfico das leituras de tensão, ao longo do processo.

5.1 Sensoriamento e Transmissão de Dados

O primeiro teste realizado foi verificar a capacidade de transmissão de dados do módulo de carga e sensoriamento para o aplicativo de monitoramento, bem como validar os dados transmitidos. Primeiramente, utilizou-se um multímetro para checar a tensão sobre os terminais de uma bateria de Li-Ion, sendo encontrado um valor de 4,1 V. Em seguida, o dispositivo foi colocado em uma sala com ar-condicionado configurado a 22°C, sendo posto para funcionar sem a alimentação do TP4056, permitindo a aquisição de dados da bateria sem que ela estivesse sendo efetivamente carregada. O *Arduino* foi então conectado a um computador, permitindo a leitura dos dados escritos em sua porta serial, através do monitor disponibilizado em sua IDE. Os dados disponibilizados na porta serial foram comparados com aqueles recebidos no aplicativo de monitoramento, a fim de verificar se eles conferiam com dados enviados pelo módulo de carga e sensoriamento.

A Figura 5.1 apresenta as primeiras leituras obtidas após o início do teste. É possível verificar que a primeira leitura transmitida pelo módulo de carga e sensoriamento foi realizada às 01:00:41.880. A segunda leitura ocorreu às 01:01:41.942, ou seja, 1 minuto e 62 milésimos de segundo após a primeira leitura. Essa tendência se replica para as medições subsequentes, sendo possível afirmar que os dados dos sensores são transmitidos em intervalos de aproximadamente 1 minuto, conforme desejado. A Figura 5.2 apresenta a tela do aplicativo de monitoramento, demonstrando que os dados dos sensores são recebidos com sucesso.

Dentre as leituras exibidas na Figura 5.1, é possível perceber que, nos piores casos, há uma discrepância de 0,03 V e 1°C entre os valores medidos e os valores reais de tensão e temperatura, equivalendo a erros percentuais de 0,7% e 4,5%, respectivamente. A faixa de erro encontrada para a tensão se mostra adequada aos propósitos do projeto, visto que permite ao usuário receber informações suficientemente precisas do estado da bateria. Em relação às medições de temperatura, embora estas apresentem erros que ultrapassam uma casa decimal, as leituras possibilitam o usuário discernir com facilidade se a bateria está se aquecendo em demasia



```
codigo_tcc_v4_eng.ino | Arduino IDE 2.0.0
File Edit Sketch Tools Help
Output Serial Monitor X
Message (Ctrl + Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM4')

01:00:41.843 -> Enviando dados dos sensores...
01:00:41.880 -> 4.13,22.75
01:01:41.896 -> Enviando dados dos sensores...
01:01:41.942 -> 4.12,22.65
01:02:41.929 -> Enviando dados dos sensores...
01:02:41.962 -> 4.12,22.61
01:03:41.998 -> Enviando dados dos sensores...
01:03:42.031 -> 4.13,22.43
01:04:42.063 -> Enviando dados dos sensores...
01:04:42.124 -> 4.12,22.63
01:05:42.120 -> Enviando dados dos sensores...
01:05:42.156 -> 4.12,22.68
01:06:42.172 -> Enviando dados dos sensores...
01:06:42.218 -> 4.12,22.61
01:07:42.202 -> Enviando dados dos sensores...
01:07:42.235 -> 4.12,22.78
01:08:42.271 -> Enviando dados dos sensores...
01:08:42.313 -> 4.12,23.00
01:09:42.338 -> Enviando dados dos sensores...
01:09:42.380 -> 4.12,22.58
```

Figura 5.1: Log do sistema durante teste de aquisição e transmissão de dados (Fonte: O autor).

ou não, cumprindo o papel que o sensor de temperatura deve desempenhar no circuito.

Além de testar a precisão das informações transmitidas, considerou-se importante verificar como a distância entre o usuário do aplicativo de monitoramento e o carregador influencia a transmissão de informações. Para isso, o sistema foi posto para funcionar em um escritório, com o usuário se movendo para diversas posições diferentes em salas próximas, averiguando se o aplicativo continua recebendo os dados transmitidos. A Figura 5.3 apresenta uma planta baixa simplificada dos ambientes utilizados para teste, com o ponto azul indicando a posição do carregador, os pontos verdes indicando os locais em que o aplicativo recebe os dados normalmente, os pontos laranja indicando os locais em que a transmissão se mostra intermitente, e os pontos vermelhos indicando os locais em que se perde a comunicação com o carregador.

É possível perceber que, quando não há obstáculos entre o carregador e o dispo-



Figura 5.2: Dados dos sensores exibidos na tela do aplicativo de monitoramento (Fonte: O autor).

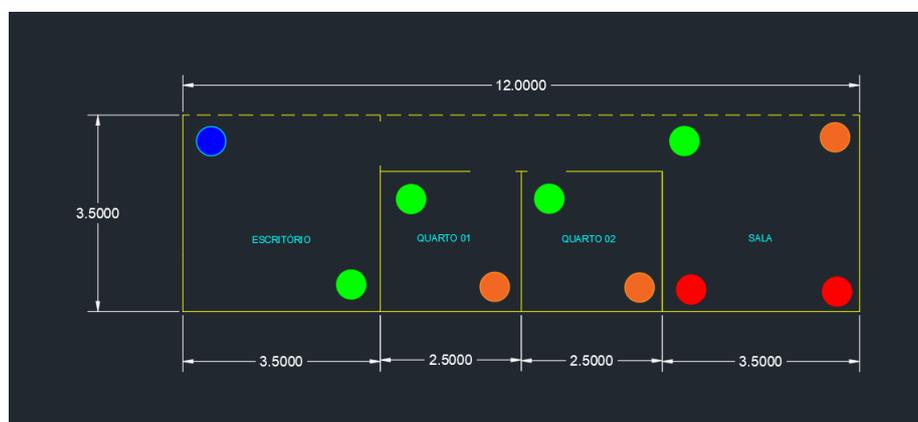


Figura 5.3: Planta baixa do ambiente para realização de testes, com indicação da qualidade da conexão *bluetooth* em diversos pontos (Fonte: O autor).

sitivo em que o aplicativo de monitoramento está rodando, a transmissão de dados ocorre com sucesso em distâncias de até pouco mais de 8 metros. Na presença de paredes, o sinal transmitido é atenuado, de forma que o aplicativo deixa de receber informações continuamente. Assim, no canto direito inferior dos quartos e na região

da sala o aplicativo deixa de funcionar. Esse comportamento é esperado, visto que a comunicação *bluetooth* implementada pelo HC-05 apresenta um alcance máximo de aproximadamente 10 metros. É possível dizer, portanto, que o aplicativo apresenta bom funcionamento para monitoramento de curta distância. Para um monitoramento de longas distâncias, seria necessário a utilização de outros protocolos de comunicação, a exemplo do *Wi-Fi*.

5.2 Funcionamento Padrão

Após confirmar que o sistema apresenta a capacidade de adquirir dados dos sensores e transmiti-los ao aplicativo de monitoramento via *bluetooth*, prosseguiu-se com a verificação do funcionamento padrão do sistema. Em circunstâncias normais, isto é, caso não haja excesso de temperatura ou um comando solicitando o desligamento do circuito de carga, o carregador deve atuar de forma a elevar a tensão de uma bateria de Li-Ion até que o critério de parada seja atingido.

Para testar se o sistema apresenta o comportamento esperado, ele foi utilizado para efetuar o carregamento de uma bateria de Li-Ion de $2600mAh$, que se encontrava inicialmente descarregada. Ao iniciar o processo, verificou-se que o LED vermelho do TP4056 se acendeu, indicando que o componente se encontrava em funcionamento e, portanto, que o circuito de carga estava operando. Após pouco mais de 3 horas, o LED vermelho se apagou e o azul se acendeu, indicando que a bateria não estava mais carregando.

As últimas leituras dos sensores antes da finalização do carregamento podem ser verificadas na Figura 5.4. É possível perceber que, na leitura das 10:35:23.000, o sensor de tensão forneceu um valor de $4.15V$. As dez leituras seguintes indicavam um valor de tensão de $4.14V$, isto é, superior a $4.1V$ mas menor que o maior valor medido. Dessa forma, o critério de parada definido em *software* foi atingido, com o circuito de carga tendo sua atividade interrompida e um alerta de finalização sendo encaminhado ao aplicativo de monitoramento. A mensagem exibida ao usuário pode ser visualizada na Figura 5.5.

```
Output Serial Monitor X
Message (Ctrl + Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM4')
10:35:22.968 -> Enviando dados dos sensores...
10:35:23.000 -> 4.15,21.68
10:36:23.045 -> Enviando dados dos sensores...
10:36:23.088 -> 4.14,21.53
10:37:23.097 -> Enviando dados dos sensores...
10:37:23.135 -> 4.14,21.58
10:38:23.151 -> Enviando dados dos sensores...
10:38:23.189 -> 4.14,21.63
10:39:23.203 -> Enviando dados dos sensores...
10:39:23.237 -> 4.14,21.68
10:40:23.246 -> Enviando dados dos sensores...
10:40:23.293 -> 4.14,21.63
10:41:23.306 -> Enviando dados dos sensores...
10:41:23.341 -> 4.14,21.60
10:42:23.355 -> Enviando dados dos sensores...
10:42:23.402 -> 4.14,21.53
10:43:23.413 -> Enviando dados dos sensores...
10:43:23.460 -> 4.14,21.33
10:44:23.472 -> Enviando dados dos sensores...
10:44:23.512 -> 4.14,21.16
10:45:23.524 -> Enviando dados dos sensores...
10:45:23.558 -> 4.14,21.16
10:45:23.558 -> Carregamento finalizado.
10:45:23.623 -> E FLAG
```

Figura 5.4: Log do sistema durante os últimos instantes de carregamento (Fonte: O autor).

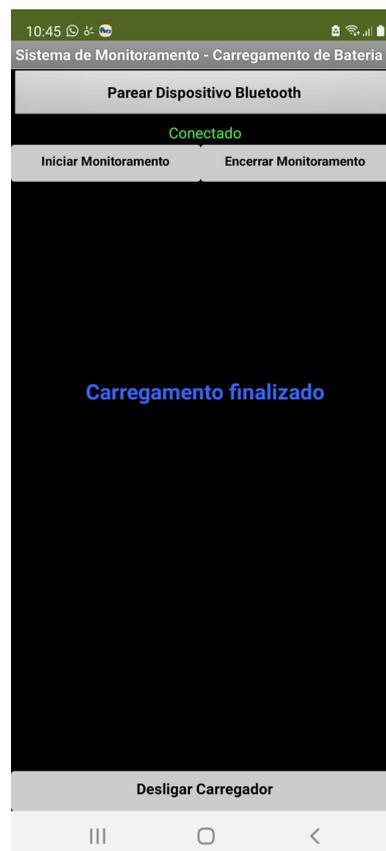


Figura 5.5: Mensagem exibida pelo aplicativo de monitoramento após finalização do carregamento (Fonte: O autor).

Tendo sido constatado que o sistema é, de fato, capaz de carregar baterias de lítio-íon, foi traçado um gráfico a partir das leituras obtidas durante o carregamento, reproduzido na Figura 5.6. Analisando o gráfico, pode-se perceber que a tensão da bateria aumentou de forma mais rápida até que atingisse cerca de 4 V, quando passou a crescer de maneira um pouco mais suave. Esse comportamento é consistente com o processo de carga implementado pelo TP4056, o qual se inicia de forma veloz e diminui de ritmo ao longo do tempo. Entretanto, percebeu-se que a tensão veio a se estabilizar apenas no final do processo de carga, indicando que o critério de parada poderia ser refinado para que a bateria passe um pouco mais de tempo na etapa de carregamento com tensão constante, aproximando-se ainda mais de sua máxima tensão teórica.

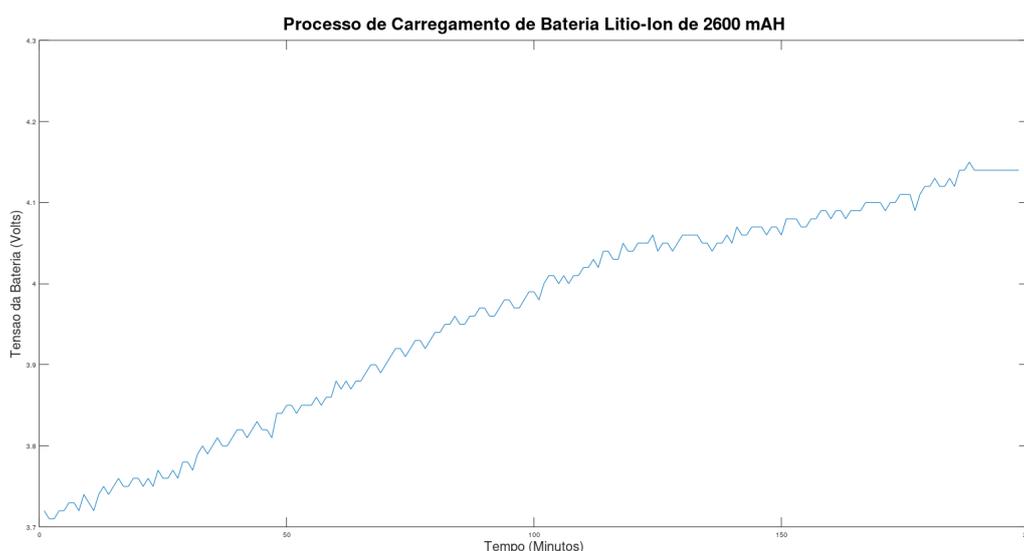


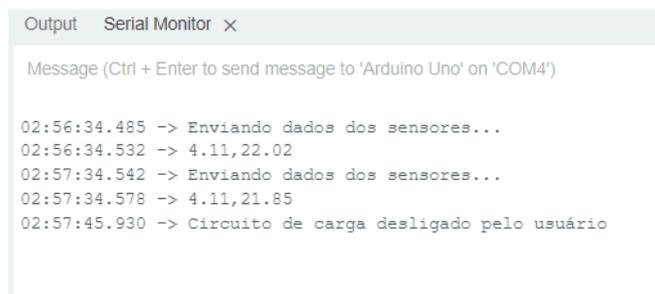
Figura 5.6: Gráfico da tensão da bateria ao longo do período de carregamento (Fonte: O autor).

Conforme indicado pela Figura 5.6, o processo de carga foi encerrado em aproximadamente 3 horas e 20 minutos. Como a bateria utilizada no teste apresentava uma capacidade de $2600mAh$, isso indica que o circuito de carga forneceu à bateria uma média de $780mA$ durante o carregamento. O valor é condizente com o esperado, visto que o TP4056 fornece uma corrente máxima de $1A$, a qual diminui durante a etapa de carregamento por tensão constante, reduzindo o valor da corrente média.

5.3 Desligamento de Emergência

Verificado o funcionamento padrão do sistema, prosseguiu-se com os testes de desligamento de emergência. Conforme exposto anteriormente, além da situação em que o sistema de carregamento desliga devido a condição normal de parada ter sido atingida, espera-se que o circuito de carga seja desativado caso o usuário pressione o botão “Desligar Carregador” do aplicativo de monitoramento, ou ainda caso a temperatura da bateria exceda 40°C , a fim de evitar efeitos indesejados e a possibilidade de fuga térmica.

O teste do botão “Desligar Carregador” foi feito de forma direta, sendo o carregador posto para funcionar e o botão pressionado logo após a confirmação da conexão e início do recebimento de dados pelo aplicativo. Conforme pode ser verificado no *log* apresentado na Figura 5.7, após o recebimento de dados às 02:57:34.578, o sistema foi encerrado às 02:57:45.930. O desligamento foi comprovado pelos LEDs do TP4056, sendo verificado que o LED vermelho desligou e o azul se acendeu, indicando que o circuito não estava conduzindo corrente. A mensagem exibida no aplicativo, após o botão ser pressionado, pode ser visualizada na Figura 5.8, informando o usuário que o circuito de carga foi devidamente desligado.



```
Output Serial Monitor x
Message (Ctrl + Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM4')
02:56:34.485 -> Enviando dados dos sensores...
02:56:34.532 -> 4.11,22.02
02:57:34.542 -> Enviando dados dos sensores...
02:57:34.578 -> 4.11,21.85
02:57:45.930 -> Circuito de carga desligado pelo usuário
```

Figura 5.7: *Log* do sistema durante o teste de desligamento manual através do aplicativo de monitoramento (Fonte: O autor).

Para verificar o seccionamento do circuito de carga devido à alta temperatura, o sensor LM35 foi afastado do soquete de encaixe da bateria e aquecido com o auxílio de um secador de cabelos. Dessa forma, foi possível verificar o funcionamento dessa modalidade de desligamento de emergência sem que a bateria fosse, de fato,

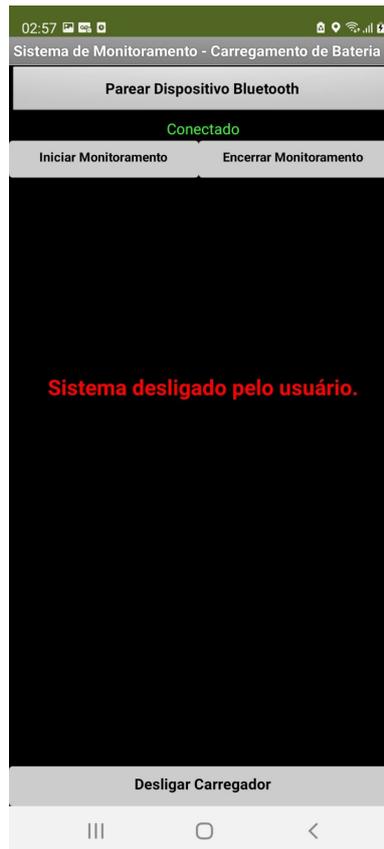


Figura 5.8: Mensagem exibida pelo aplicativo de monitoramento após acionamento do comando de desligamento (Fonte: O autor).

submetida à altas temperaturas. A Figura 5.9 apresenta o *log* do teste realizado, tendo o código do sistema sido ligeiramente modificado para exibição das medições periódicas de temperatura, as quais ocorrem em intervalos aproximados de 5s.

Conforme demonstrado pela Figura 5.9, a temperatura da bateria se encontrava em torno de $27-28^{\circ}C$ até a leitura das 02:00:29.206. O valor passou a aumentar a partir da leitura seguinte, devido ao secador de cabelos ter sido ligado e direcionado ao LM35. Logo após a leitura das 02:00:39.221, quando o sistema mediu uma temperatura de $49,73^{\circ}C$, ocorreu a transmissão de um alerta ao aplicativo de monitoramento, acusando a detecção de uma sobretemperatura. Nesse momento, verificou-se que o LED azul do TP4056 se acendeu no lugar do vermelho, indicando o desligamento do circuito de carga. Além disso, constatou-se o recebimento do alerta de altas temperaturas no aplicativo de monitoramento, reproduzido na Figura 5.10.

```
01:59:39.164 -> Temperatura da bateria:
01:59:39.164 -> 30.57
01:59:44.156 -> Temperatura da bateria:
01:59:44.203 -> 30.28
01:59:49.157 -> Temperatura da bateria:
01:59:49.204 -> 29.50
01:59:54.175 -> Temperatura da bateria:
01:59:54.175 -> 29.67
01:59:59.183 -> Temperatura da bateria:
01:59:59.183 -> 29.13
02:00:04.196 -> Temperatura da bateria:
02:00:04.196 -> 28.79
02:00:09.089 -> Enviando dados dos sensores...
02:00:09.125 -> 4.15,28.79
02:00:09.195 -> Temperatura da bateria:
02:00:09.195 -> 28.47
02:00:14.175 -> Temperatura da bateria:
02:00:14.219 -> 28.30
02:00:19.189 -> Temperatura da bateria:
02:00:19.233 -> 27.61
02:00:24.187 -> Temperatura da bateria:
02:00:24.233 -> 27.93
02:00:29.206 -> Temperatura da bateria:
02:00:29.206 -> 27.37
02:00:34.215 -> Temperatura da bateria:
02:00:34.215 -> 32.36
02:00:39.221 -> Temperatura da bateria:
02:00:39.221 -> 49.73
02:00:39.253 -> Temperatura acima do limite. Desligando circuito...
02:00:39.296 -> T FLAG
```

Figura 5.9: Log do sistema durante teste de desligamento por altas temperaturas (Fonte: O autor).



Figura 5.10: Mensagem exibida pelo aplicativo de monitoramento indicando detecção de sobre-temperatura (Fonte: O autor).

Capítulo 6

Conclusão

Nesse trabalho, foi apresentado o desenvolvimento e a implementação de um carregador inteligente para baterias de lítio-íon, capaz de medir as condições de tensão e temperatura da bateria e transmitir essas informações via *bluetooth* para monitoramento através de um aplicativo *android*. O sistema foi elaborado para garantir um carregamento seguro, possibilitando ao usuário verificar o estado da bateria minuto a minuto e fornecendo recursos de desligamento automático, mediante comando e no caso da bateria ser submetida a altas temperaturas.

O sistema como um todo foi dividido em dois subsistemas - o módulo de carga e sensoramento e o aplicativo de monitoramento. O primeiro é responsável pelo fornecimento de carga à bateria de Li-Ion, aquisição de dados dos sensores de tensão e temperatura, e tratamento e transmissão das informações obtidas. O segundo, por sua vez, possui o papel de receber as leituras oriundas do módulo de carga e sensoramento, apresentando-as ao usuário através de uma interface visual. O aplicativo de monitoramento também permite ao usuário iniciar e interromper o recebimento de dados da bateria, além de fornecer a opção de interromper o carregamento no instante desejado.

Através da realização de testes funcionais, foi possível verificar na prática o desempenho do sistema desenvolvido. Constatou-se que o carregador consegue fornecer, durante a etapa de carga com corrente constante, uma média de $780mA$ para uma bateria de Li-Ion de $2600mAh$, conseguindo levá-la de um estado de descarga

ao estado de carga total em cerca de 3h20min. Esse resultado é satisfatório, uma vez que a corrente fornecida se aproxima da máxima que o TP4056 consegue fornecer, proporcionando um carregamento em tempo hábil e condizente com o que era esperado teoricamente. É possível dizer ainda que o carregamento ocorre de forma segura, visto que a temperatura da bateria é checada em média a cada 5s, sendo o fornecimento de carga interrompido quando a bateria é submetida a temperaturas superiores a $40^{\circ}C$.

Em relação à transmissão de dados, verificou-se que o módulo de carga e sensoriamento obtém informações suficientemente precisas do LM35 e do sensor de tensão, repassando-as ao aplicativo de monitoramento via *bluetooth*. A transmissão de dados ocorre em intervalos de aproximadamente 1 minuto, de forma que o usuário possa ser constantemente atualizado acerca do estado da bateria. A comunicação estabelecida entre o carregador e um *smartphone* rodando o aplicativo de monitoramento, permanece estável a uma distância de até pouco mais de 8 metros com visada, sendo o alcance reduzido na presença de obstáculos entre os dispositivos. Dessa forma, o sistema se mostra útil para monitoramento a curtas distâncias, apresentando um comportamento que condiz com as características e limitações da comunicação *bluetooth*.

É possível afirmar, portanto, que o sistema proposto foi capaz de atingir os objetivos desejados, proporcionando o carregamento de baterias lítio-íon de forma rápida e segura, conforme constatado pelos testes funcionais. A transmissão e recepção de dados via *bluetooth* se mostrou eficiente para curtas distâncias, garantindo que o usuário receba informações atualizadas do estado da bateria. O aplicativo de monitoramento atuou de forma adequada, exibindo em tela as informações recebidas e emitindo alertas sempre que o carregamento fosse interrompido, notificando o usuário e indicando o motivo da interrupção.

6.1 Dificuldades Encontradas

Apesar do sistema implementado ter apresentado desempenho satisfatório, foram encontradas certas dificuldades durante o desenvolvimento do projeto. De forma geral, a maior parte dos obstáculos puderam ser solucionados ou contornados, através da realização de ajustes nas interligações entre os componentes e na lógica de funcionamento do dispositivo, conforme será descrito a seguir.

A primeira dificuldade encontrada estava associada à alimentação elétrica do sistema. Inicialmente, o módulo de carga e sensoriamento foi concebido de forma que o TP4056 deveria ser alimentado pelo pino de 5V do *Arduino UNO*, sendo o *Arduino* alimentado por uma fonte externa, através de seu cabo USB. Entretanto, foi verificado que essa configuração limitava a corrente que chegava à bateria durante o processo de carregamento, não superando $200mA$. Para solucionar a questão, optou-se por alimentar o TP4056 por meio de sua entrada MicroUSB, através da utilização de um cabo USB-MicroUSB. Dessa forma, foram obtidas correntes de até $780mA$, mais condizentes com o que era esperado teoricamente. Em contrapartida, o sistema passou a apresentar não apenas um, mas dois cabos de alimentação, que devem ser plugados a uma fonte externa para garantir o funcionamento total do carregador - um cabo para o *Arduino* e um para o TP4056.

Outra dificuldade identificada estava ligada à aquisição de dados dos sensores de tensão e temperatura. Durante os testes prévios do funcionamento do sistema, percebeu-se que os valores obtidos eram instáveis e divergiam demasiadamente do real. Após uma reanálise do código implementado no *Arduino* para leitura dos dados, constatou-se que o problema não era decorrente do *software* desenvolvido. Além disso, foi verificado que os sensores funcionavam normalmente quando utilizados em circuitos mais simples, não se mostrando defeituosos. Ao analisar o *datasheet* do LM35, verificou-se a informação de que, a fim de garantir leituras precisas, é ideal eliminar ou reduzir possíveis fontes de interferência em seu pino de terra (Texas-Instruments, 2017). Baseando-se nesse fato, decidiu-se utilizar um pino terra do *Arduino UNO* exclusivamente para os sensores de tensão e temperatura, resultando

em leituras mais condizentes com a realidade.

Em relação ao chaveamento do sistema, para desligamento sob demanda ou em caso de emergência, foram constatadas diversas dificuldades, as quais estavam associadas ao tipo do MOSFET utilizado como *switch*. De início, planejava-se usar um MOSFET de canal n para esse papel, devido a sua maior disponibilidade comercial. Entretanto, conforme discorrido na seção 3.2.6, esse tipo de MOSFET não é recomendado quando se deseja realizar o chaveamento de um circuito entre a fonte de alimentação e a carga, sendo ideal utilizar um MOSFET de tipo p nesse caso. Por esse motivo, antes de se realizar a substituição do MOSFET no sistema, foi verificado que o chaveamento não funcionava de forma adequada, com o carregador nem sempre sendo efetivamente ligado. Após a troca do MOSFET de tipo n por um do tipo p (IRF9540), o chaveamento passou a funcionar conforme desejado.

Por último, tem-se a questão das variáveis monitoradas pelo sistema. Durante a fase de concepção do projeto, havia a ideia de se utilizar um sensor de corrente para obter informações da corrente que circula pela bateria de Li-Ion a ser carregada, além dos dados de tensão e temperatura. As leituras obtidas seriam utilizadas para estabelecer um critério de parada fino para o processo de carregamento, de forma que o circuito seria desligado quando a corrente caísse abaixo de um determinado valor. Assim, seria possível garantir que a bateria estivesse ainda mais próxima de sua carga total, antes do carregamento ser interrompido. No entanto, as tentativas de pôr o sistema para funcionar junto a um sensor de corrente se mostraram infrutíferas. Ao conectar o sensor em série com a bateria de Li-Ion a ser carregada, o TP4056 deixou de fornecer corrente à bateria, possivelmente por considerar a tensão sobre o conjunto “sensor + bateria” como se fosse a tensão apenas sobre a bateria, comportando-se como se ela se encontrasse carregada. Além disso, devido à decisão de alimentar o TP4056 através de um cabo USB-MicroUSB, não foi possível conectar o sensor entre a fonte de alimentação do sistema e o TP4056, inviabilizando a utilização do sensor de corrente. Para mitigar os impactos causados pela ausência do sensor, foi elaborado o critério de parada discutido na seção 4.1.2, envolvendo o nível de tensão

entre os terminais bateria e o tempo decorrido desde o último aumento de seu valor.

6.2 Trabalhos Futuros

O projeto desenvolvido apresentou bons resultados em relação ao que foi inicialmente proposto. No entanto, após a implementação do sistema e realização dos testes funcionais, foi possível enxergar algumas oportunidades de aperfeiçoamento, as quais poderiam tornar o projeto mais eficiente e robusto. A seguir, serão feitas algumas considerações acerca de melhorias sugeridas para trabalhos futuros.

A primeira sugestão é realizar o estudo e a implementação de metodologias diferentes para o carregamento de baterias Li-Ion. Embora o TP4056 consiga realizar a carga com uma taxa C de até $1Ah$, o que é suficiente para garantir celeridade ao processo de carregamento, métodos de ultra velocidade têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Dessa forma, poderia ser realizada uma pesquisa a fim de investigar como esses métodos funcionam e se é viável implementá-los no contexto do sistema desenvolvido. Caso a implantação seja exequível, seria possível traçar um comparativo entre os diferentes métodos utilizados, avaliando qual o mais eficiente de diferentes pontos de vista, como velocidade, segurança e custo.

No contexto de sensoriamento e transmissão de dados, poderiam ser utilizados outros sensores para adquirir diferentes informações do sistema. Conforme mencionado anteriormente, a utilização de um sensor de corrente, por exemplo, poderia ajudar no monitoramento do processo de carregamento, permitindo a criação de um critério de parada mais refinado. Para um sistema de carregamento de baterias, recomenda-se buscar realizar o sensoriamento de corrente por meio de um sensor de efeito *hall* ou de um resistor *shunt*. Um sensor de efeito *hall* é constituído por um material condutor que, ao ser submetido ao campo magnético gerado por uma corrente elétrica, produz uma tensão entre seus terminais proporcional a essa corrente. Um resistor *shunt*, por sua vez, é um resistor de valor muito baixo que, ao ser posicionado no caminho da corrente que se deseja medir, passa a exibir uma tensão entre seus terminais proporcional à referida corrente (Allard, 2019).

Em relação ao processo de transmissão de dados, a substituição do módulo *bluetooth* por módulos capazes de implementar protocolos de transmissão de longo alcance permitiria aumentar a abrangência do sistema, de forma que o monitoramento do carregamento da bateria poderia ser realizado a grandes distâncias, não sendo necessário que o usuário esteja em um ambiente próximo ao carregador para checar o andamento do processo.

Por fim, o aplicativo de monitoramento poderia ser aprimorado tanto no quesito visual quanto em relação a suas funcionalidades. Em relação à parte visual, a criação de uma barra indicando a evolução do carregamento da bateria e de um gráfico representando as leituras dos sensores ao longo do tempo, poderiam tornar a aplicação mais agradável e intuitiva ao usuário. Em relação aos aspectos funcionais, os dados relativos ao processo de carregamento poderiam ser salvos na memória, possibilitando ao usuário comparar as informações obtidas em diferentes ciclos de carregamento. Assim, além dos dados relativos ao carregamento em si, o sistema disponibilizaria informações pertinentes ao desempenho do carregador em si, permitindo ao usuário identificar possíveis falhas no equipamento ou se a bateria carregada está se aproximando do fim de sua vida útil.

Referências

Allard, S. (2019). Shunt resistor versus hall effect technology. <https://www.knick-international.com/pt-br/blog/2019/shunt-resistor-versus-hall-effect-technology/>. Acesso em: 20/06/2023.

Arduino (2013). Getting started with arduino. <https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/getting-started-arduino>. Acesso em: 09/04/2023.

Arduino (2023). Arduino Uno R3. <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>. Acesso em: 09/04/2023.

Atkins, P. e Jones, L. (2012). *Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente*. Bookman, 5. edição.

Azzellini, G. C. (2017). Eletroquímica. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4993362/mod_resource/content/1/MSu_Eletroqu%C3%ADmica_V3.pdf. Acesso em: 25/02/2023.

Baronti, F., Femia, N., Saletti, R., Visone, C., e Zamboni, W. (2014). Hysteresis modeling in li-ion batteries. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(11):1–4.

Berte, D. R. (2018). Defining the iot. In *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, volume 12, páginas 118–128.

Britannica, E. (2013). Commercially exploited bands of the radio-frequency spectrum. <https://kids.britannica.com/students/assembly/view/183680>. Acesso em: 18/03/2023.

Chakraborty, D., Ely, T. O., e Kamzabek, D. (2019). Batteries safety: Recent progress and current challenges. *Frontiers in Energy Research*, 7(71).

de Alencar Júnior, H. B., da Silva, D. D., e de Sousa, M. F. (2019). *Automação Residencial com Arduino: utilizando bluetooth e android*. Instituto de Educação Superior da Paraíba – IESP, 1. edição.

de Oliveira Medeiros, J. C. (2007). *Princípios de Telecomunicações*. Editora São Paulo, 5. edição.

ElectronicsHUB (2023). Interfacing voltage sensor with arduino measure up to 25v using arduino.

<https://www.electronicshub.org/interfacing-voltage-sensor-with-arduino/>. Acesso em: 16/04/2023.

Ferreira, Y. P. U. M., Machado, A. F., Moura, D. B., e Silva, C. E. d. (2016). O estudo da diferença de potencial (ddp) a partir de reação de oxirredução (pilha) e aplicação da modelagem e situação computacional. *Revista Sustinere*, 4(1):61–81.

Fontes, A. M., Lourenço, M. F. d. P., e Messeder, J. C. (2012). A representação experimental da pilha de daniell nos livros didáticos: um erro questionado. In *XVI Encontro Nacional de Ensino de Química (XVI ENEQ) e X Encontro de Educação Química da Bahia (X EDUQUI)*, Salvador.

Galushkin, N. E., Yazvinskaya, N. N., e N., G. D. (2018). Mechanism of thermal runaway in lithium-ion cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 165:1303–1308.

Ganssle, J. (2008). *The Art of Designing Embedded Systems*. Newnes Books, 2. edição.

Gomes, T. C. S. e Melo, J. C. B. d. (2013). App inventor for android: Uma nova possibilidade para o ensino de lógica de programação. In *II Congresso Brasileiro de Informática na Educação*.

Grey, C. P. e Hall, D. S. (2020). Prospects for lithium-ion batteries and beyond - a 2030 vision. *Nature Communications*, 11(6279).

Islas, O. A., Sanchez, M. A., Aguilar, L., e Palafox, L.-E. (2018). Optimización del proceso de carga de una batería lipo utilizando el dispositivo integrado tp4056. *Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada*, 6(12):111–115.

Joseph, J. (2022). Types of arduino boards - quick comparison on specification and features. <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-arduino-boards>. Acesso em: 09/04/2023.

Julien, C., Mauger, A., Vijh, A., e Zaghbi, K. (2016). *Lithium Batteries: Science and Technology*. Springer, 1. edição.

Junior, A. W. L. (2013). *Eletricidade e Eletrônica Básica*. Alta Books Editora, 4. edição.

- Khumbar, A. (2017). Overview of ism bands and software-defined radio experimentation. *Wireless Personal Communications*, 97.
- Kong, L., Li, C., Jiang, J., e Pecht, M. (2018). Li-ion battery fire hazards and safety strategies. *Energies*, 11(9).
- Lyu, P., Liu, X., Qu, J., Zhao, J., Huo, Y., Qu, Z., e Rao, Z. (2020). Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage. *Energy Storage Materials*, 31:195–220.
- Man, K., Ting, T., Krilavičius, T., Wan, K., Chen, C., Chang, J., e Poon, B. S. H. (2012). Towards a hybrid approach to soc estimation for a smart battery management system (bms) and battery supported cyber-physical systems (cps). *2012 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications, BCFIC 2012*.
- Michelini, A. (2017). *Baterias recarregáveis para equipamentos portáteis*. STA - Sistemas e Tecnologia Aplicada, 1. edição.
- NanJing-Corp. (2023). Tp4056 - 1a standalone linear li-ion battery charger with thermal regulation in sop-8.
<https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>.
Acesso em: 12/04/2023.
- Oliveira, A. G. M. I. d. e Oliveira, I. T. P. d. (2001). Construção de uma pilha didática de baixo custo. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 18(1):101–107.
- Oppenheim, A. V. e Willsky, A. S. (2010). *Sinais e Sistemas*. Pearson, 2. edição.
- Pérez, F. E. V. e Areny, R. P. (2007). *Microcontroladores: Fundamentos y Aplicaciones con PIC*. Marcombo S.A., 1. edição.
- Pistoia, G. (2014). *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications*. Elsevier, 1. edição.
- Prokhorov, A. e Gerzheva, O. (2011). Model of mosfet in delphi. dissertação, School of Information Science, Computer and Electrical Engineering.
- Rezende, S. (2004). *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. Editora Livraria da Física, 3. edição.
- Sasaki, T., Ukyo, Y., e Novák, P. (2013). Memory effect in a lithium-ion battery. *Nature Materials*, 12:569–575.
- Sedra, A. S. e Smith, K. C. (2004). *Microeletrônica*. Pearson, 4. edição.

- Silberberg, M. S. (2009). *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change*. McGraw-Hill Higher Education, 5. edição.
- Texas-Instruments (2017). Lm35 precision centigrade temperature sensors. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>. Acesso em: 16/04/2023.
- Thomazini, D. e Albuquerque, P. U. B. d. (2020). *Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações*. Editora Érica.
- Verma, M., Singh, S., e Kaur, B. (2015). An overview of bluetooth technology and its communication applications. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5(3).
- Vieira, D. d. S. e Pereira, A. d. A. (2018). Comunicação wireless: Transmissão e recepção de sinal sonoro utilizando os módulos 433rf e arduino uno. In *Brazilian Technology Symposium*, Campinas.
- Vishay-Siliconix (1997). P-channel mosfets, the best choice for high-side switching. <https://www.vishay.com/docs/70611/70611.pdf>. Acesso em: 19/04/2023.
- Vishay-Siliconix (2021). Irf9540 power mosfet. <https://www.vishay.com/docs/91078/91078.pdf>. Acesso em: 19/04/2023.
- Xu, B., Kong, L., Wen, G., e Pecht, M. (2021). Protection devices in commercial 18650 lithium-ion batteries. *IEEE Access*, 9.
- Yepez-López, I., Villavazo-Laureano, E., Flores-Benítez, R., e Pérez-González, M. A. (2019). Activación de cargas eléctricas através de comandos de voz vía módulo hc-05 y arduino. *Conciencia Tecnológica*, 57.