

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

JOSÉ VICTOR COSTA DOBIES

Sistema de monitoramento de baterias Íon-Lítio

São João da Boa Vista

2022

José Victor Costa Dobies

Sistema de monitoramento de baterias Íon-Lítio

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações .

Orientador: Prof^o Dr. André Alves Ferreira

São João da Boa Vista

2022

D633s Dobies, José Victor Costa
Sistema de monitoramento de baterias Íon-Lítio / José Victor Costa
Dobies. -- São João da Boa Vista, 2022
61 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: André Alves Ferreira

1. Baterias elétricas. 2. Controladores programáveis. 3. Sistemas de controle supervisão. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BATERIAS ÍON-LÍTIO

Aluno: José Victor Costa Dobies
Orientador: Prof. Dr. André Alves Ferreira

Banca Examinadora:

- André Alves Ferreira (Orientador)
- Lucas Marim da Silva (Examinador)
- Paula Ghedini Der Agopian (Examinadora)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 053/2021)

São João da Boa Vista, 31 de janeiro de 2022

“Não sabemos de onde virá o próximo grande salto, nem quem o dará”
(Stephen Hawking)

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida e da sabedoria. Por me fortalecer nos momentos de angustias e frustrações.

Aos meus pais, Márcia e José Roberto, pelo sustento durante toda minha vida, por confiarem e acreditarem sempre na minha capacidade, incentivando sempre a escolher os melhores caminhos . Em especial a minha mãe, que sempre sonhou por esse momento, me motivando a cada instante, não deixando eu desistir.

Aos meus irmãos, Murilo e Lucas, que sempre foram grandes incentivadores, representando lealdade e segurança, fazendo-me lembrar o quanto sou capaz.

À minha noiva, Sabrina Martin Felipe, que sempre me motivou a batalhar por nossos sonhos. E que hoje é o meu maior exemplo de determinação, fé e persistência.

À todos os professores, que puderam compartilhar uma pequena parte de seus conhecimentos acadêmicos, me inspirando e incentivando a me tornar um profissional cada vez melhor. Em especial, a Prof. Dra. Paula Ghedini Der Agopian, que sempre acreditou no meu potencial, me proporcionando vários desafios durante minha vida acadêmica.

Ao Prof. Dr. André Alves Ferreira, que aceitou o desafio de me acompanhar nesse trabalho de conclusão de curso, provendo-me todo o apoio, suporte e confiança necessários para a elaboração deste trabalho.

À Energy Source, por me proporcionar a oportunidade de fazer parte dessa empresa, na qual abriu as portas para que esse trabalho pudesse ser realizado.

À Cracto pelo incentivo do término dessa etapa, por toda rede de apoio, motivação, conforto e carinho que me proporcionaram.

À todos que participaram direta ou indiretamente da minha vida acadêmica, cooperando para que esse momento fosse possível.

RESUMO

Neste trabalho estudamos o desenvolvimento do *hardware*, *firmware*, servidor *web* e supervisor de um sistema de monitoramento para bateria Íon-Lítio, utilizando o método de Contagem de Coulomb para estimar o estado de carga da bateria. O microcontrolador ESP32 coleta e envia as informações ao servidor por meio do *Wi-Fi*, utilizando o conversor analógico-digital para realizar as leituras nos sensores de tensão, corrente e temperatura. O conversor apresenta resposta não linear, no qual foi desenvolvido um algoritmo para corrigir a imprecisão do conversor, obtendo dados com erros inferiores à 0,5%. No supervisor desenvolvido são apresentados de forma clara os dados atuais e histórico da bateria, possibilitando a obtenção das informações e gráficos fora da plataforma.

PALAVRAS-CHAVE: Baterias Íon-Lítio. Microcontroladores. Supervisor.

ABSTRACT

In this work we study the development of hardware, firmware, web server and supervisory of a monitoring system for Li-Ion battery, using the Coulomb Count method to estimate the state of charge of the battery. The ESP32 microcontroller collects and sends information to the server through Wi-Fi, using the analog-digital converter to take readings from the voltage, current and temperature sensors. The converter has a non-linear response, in which an algorithm was developed to correct the inaccuracy of the converter, obtaining data with an error of less than 0.5%. In the developed supervisor, current and historical battery data are clearly presented, making it possible to obtain information and graphics outside the platform.

KEYWORDS: Li-Ion batteries. Microcontrollers. Supervisor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Processo de carga e descarga em Célula Íon-Lítio	15
Figura 2	Curva de descarga de célula Íon-Lítio	16
Figura 3	Baterias com células de Óxido de Lítio-Cobalto de 3,6V 2Ah	17
Figura 4	Construção de uma bateria Íon-Lítio	17
Figura 5	Diodo como proteção de inversão de polaridade	20
Figura 6	Divisor de Tensão	21
Figura 7	Arquitetura do ESP32	22
Figura 8	Diagrama de blocos ADC	22
Figura 9	Sinal analógico contínuo no domínio do tempo	22
Figura 10	Sinal discretizado após passar pela amostragem	23
Figura 11	Sinal quantizado após passar pela quantização	23
Figura 12	Sinal digital após passar pela codificação	23
Figura 13	Sinais durante a conversão do ADC	24
Figura 14	Camadas do Modelo OSI	24
Figura 15	Camadas do Modelo TCP/IP	26
Figura 16	Chamada HTTP	27
Figura 17	Requisição HTTP	27
Figura 18	Resposta HTTP	28
Figura 19	Sensor de corrente HSTS016-200A	31
Figura 20	Termistor NTC 10k Ω	31
Figura 21	Microcontrolador ESP32-DevKit-v1	32
Figura 22	Resposta do ADC e multímetro	34
Figura 23	Erro ADC em comparação ao Multímetro	35
Figura 24	Diagrama Elétrico. É utilizado diodo 1N4007, circuito integrado LM2576HV, bobina, capacitores, diodo zener e potenciômetro para ajuste da tensão de saída	37
Figura 25	Diagrama Elétrico. É utilizado resistores da série E24 e termistor NTC de 10k Ω	37
Figura 26	Diagrama Elétrico. Microcontrolador ESP32	38
Figura 27	Camada superior da PCB, sem plano terra para melhor visualização da disposição dos componentes e trilhas.	38
Figura 28	Camada superior da PCB, com plano terra. A parte cobreada é representada pela cor vinho, o material FR-4 é representado pela cor verde, furos metalizados são representado por um círculo amarelo e os textos e marcações são representados pela cor azul.	39
Figura 29	PCB em 3D.	40
Figura 30	Estrutura da requisição de autenticação.	41
Figura 31	Estrutura da requisição de inserção de dados.	42
Figura 32	Estrutura da requisição de consulta de dados.	42

Figura 33	Equação de conversão digital para tensão.	43
Figura 34	Tela de <i>login</i>	44
Figura 35	Tela de monitoramento.	44
Figura 36	Foto da PCB utilizada para realizar as medições.	45
Figura 37	Calibração do dispositivo	45
Figura 38	Foto do dispositivo monitorando uma bateria de 44,4V 360Ah.	46
Figura 39	Resultado do monitoramento no supervísório.	47
Figura 40	Gráficos de tensão, corrente, temperatura, estado de carga, energia e potência instantânea, obtidos durante o teste.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das Baterias à base de Lítio	16
Tabela 2 – Características dos modelos de BMS	18
Tabela 3 – Padrões IEEE 802.11	27
Tabela 4 – Requisição HTTP	28
Tabela 5 – Resposta HTTP	28
Tabela 6 – Códigos de Resposta HTTP	29
Tabela 7 – Faixas de Operação	30
Tabela 8 – Sensor de corrente HSTS016-200A	30
Tabela 9 – Microcontrolador ESP32	32
Tabela 10 – Circuito Integrado LM2576HV	33
Tabela 11 – Estrutura da tabela "dadosBateria"no MySQL	42
Tabela 12 – Especificações da bateria monitorada	46
Tabela 13 – Comparação dos resultados obtidos de tensão	49
Tabela 14 – Comparação dos resultados obtidos de corrente	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog-Digital Converter</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
DC	<i>Direct Current</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RMS	<i>Root Medium Square</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	História da bateria	13
1.2	Descrição do problema e contribuição do trabalho	14
1.3	Organização do documento	14
2	CIRCUITOS ELETRÔNICOS PARA BATERIAS ÍON-LÍTIO	15
2.1	Baterias Íon-Lítio	15
2.1.1	Sistema de gerenciamento de bateria	18
2.1.2	Predição de estado de carga	18
2.2	Circuitos elétricos e eletrônicos	19
2.2.1	Circuito de proteção contra tensão reversa	20
2.2.2	Divisor de tensão	20
2.3	Microcontroladores	21
2.3.1	Conversor analógico-digital	21
2.4	REDES DE COMPUTADORES	24
2.4.1	Modelo OSI	24
2.4.2	Modelo TCP/IP	26
2.4.3	WiFi IEEE 802.11	26
2.4.4	Protocolo HTTP	26
3	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA DE MONITORAMENTO	30
3.1	Especificações da bateria	30
3.2	Sensores	30
3.3	Circuitos integrados	32
3.4	<i>Softwares</i> e ferramentas	33
3.4.1	Design de circuitos eletrônicos	33
3.4.2	Programação do <i>firmware</i>	33
3.4.3	Programação do servidor e supervisor	33
4	DESENVOLVIMENTO	34
4.1	Análise do conversor analógico-digital	34
4.2	Dimensionamento dos circuitos	35
4.3	Placa de monitoramento de baterias	36
4.3.1	Diagrama elétrico	37
4.3.2	Design PCB	37
4.4	Procedimento de calibração	39
4.4.1	Ajuste da tensão de saída do conversor DC-DC	39
4.4.2	Calibração das leituras do microcontrolador	39

4.5	<i>Softwares</i>	41
4.5.1	API	41
4.5.2	<i>Firmware</i>	42
4.5.3	Supervisório	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	51
	ANEXO A – PÁGINA DE CALIBRAÇÃO	53
	ANEXO B – FIRMWARE	55
	ANEXO C – DADOS OBTIDOS PELO SISTEMA DE MONITORAMENTO	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRIA DA BATERIA

De modo geral, baterias são dispositivos de armazenamento de energia elétrica que historicamente passaram por um longo processo de desenvolvimento de aprimoramento. A primeira bateria foi construída em 1802 por William Cruickshank (COUTTS, 1959), cirurgião militar e químico escocês, utilizando folhas de cobre (Cu) e zinco (Zn) soldadas em uma caixa de madeira. A partir deste momento é inventada a célula voltaica, popularmente conhecida como pilha, na qual utiliza das reação de oxidação e redução para converter energia química para elétrica (DANIEL; BESENHARD, 2012).

Posteriormente em 1836 o químico e meteorologista britânico, John F. Daniell, inventou a Célula de Daniell, a primeira pilha que foi capaz de manter uma corrente elétrica constante, por um período longo de tempo. A pilha de Daniell é composta por uma placa de zinco, imersa em uma solução de $ZnSO_4$, e por uma placa de cobre, imersa em uma solução de $CuSO_4$, interligadas por uma ponte de salina (BRAIN; BRYANT; PUMPHREY, 2015).

Em 1859 o físico francês, Gaston Planté, estudava sobre a polarização entre dois eletrodos do mesmo material, imersos em uma solução aquosa de ácido sulfúrico. Dentre de todos materiais estudados, o Chumbo (Pb) foi o que apresentava a corrente mais alta e o maior tempo de geração de energia elétrica. Em 26 de março de 1860, Gaston Planté demonstra a primeira bateria recarregável de chumbo-ácido (KURZWEIL, 2010), este tipo de bateria é a mais utilizada no mundo até os dias atuais.

As primeiras baterias Íon-Lítio foram inventadas no ano de 1912 pelo físico-químico estadunidense Gilbert Newton Lewis (MAUGER; JULIEN, 2017), entretanto, durante as tentativas de desenvolver baterias recarregáveis não foi possível utilizá-las de forma segura, devido a instabilidade inerente do lítio metálico. Estes problemas apresentavam de forma especial durante a carga destas baterias. Em 1970 se dá início a comercialização de baterias Íon-Lítio, no qual os pesquisadores, John Bannister Goodenough, Michael Stanley Whittingham e Akira Yoshino foram os principais responsáveis pelo desenvolvimento das baterias Íon-Lítio, no qual foram condecorados com o prêmio Nobel de Química de 2019. As baterias que utilizam do lítio não pararam seu desenvolvimento e com isso foram inventadas outros tipos de baterias, utilizando o mesmo conceito, tendo como destaque a invenção da $LiFePO_4$ no ano de 1996, que apresenta grande segurança (ZAGHIB et al., 2005).

Baterias são classificadas como primárias ou secundárias (CROMPTON; CROMPTON; CROMPTON, 2000). Baterias primárias não são recarregáveis, a energia provida da reação eletroquímica é irreversível. São encontradas em produtos e dispositivos de uso geral, tais como: Controle remoto, brinquedos e rádio portáteis. Os tipos mais comuns são Alcalinas e Zinco-Carbono. Baterias secundárias são recarregáveis com uma fonte de alimentação externa (CHENG et al., 2011), na qual a carga e descarga da bateria é cíclica, ou seja, é capaz de realizar o processo de oxidação e redução n vezes, dependendo da composição. São utilizadas para aplicações que requerem armazenamento elevado e cíclico de energia. Os tipos mais comuns encontrados são de chumbo-ácido, íon-lítio e níquel-hidreto.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

As baterias Íon-Lítio desde a sua criação até os dias atuais, sofrem com problemas de segurança, como a combustão da célula devido sua instabilidade (PISTOIA, 2013). Baterias de lítio apresentam a necessidade de um tipo de circuito conhecido como sistema de gerenciamento de bateria (BMS - *Battery Management System*), que é responsável pelo funcionamento correto e na correção de fatores que podem levar a danos à bateria, aumentando assim a vida útil e a segurança do equipamento (GARCHE; JOSSEN, 2000). Entretanto as baterias podem vir a ocasionar problemas os quais o BMS não consiga corrigir, assim diminuindo a segurança. Problemas como curto-circuito, sobrecarga e sobretensão são pontos em que o BMS deve agir (NIZAM et al., 2020), mas eventualmente falham. Assim como combustão próximo a bateria ou até mesmo curto-circuito da célula dentro da bateria, são problemas que o BMS não pode resolver.

Entretanto, uma solução de monitoramento possibilita a análise de dados e predição de problemas em tempo real, podendo ser executado medidas para evitar problemas com a bateria.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Neste trabalho é desenvolvido um sistema para monitoramento de Baterias Íon-Lítio, composto por *hardware*, *firmware* e *softwares*. O documento é dividido como se segue:

O **Capítulo 2** apresenta a base teórica para desenvolvimento do trabalho, sendo estas: Baterias Íon-Lítio, Circuitos elétricos e eletrônicos, Microcontroladores e Redes de Computadores.

O **Capítulo 3** descreve as configurações para o projeto, apresentado as especificações técnicas do trabalho, bem como sensores, circuitos integrados, ferramentas e *softwares* utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

O **Capítulo 4** descreve o desenvolvimento da placa eletrônica, aquisição dos dados, processo de calibração e bibliotecas para programação do *firmware*, *backend* (Servidor) e *frontend* (Supervisório).

O **Capítulo 5** apresenta os resultados obtidos na captura e tratamento dos dados, além do supervisório que é possível acessar os dados da bateria em tempo real e histórico.

Por fim, o **Capítulo 6** destaca as principais conclusões obtidas e descreve possíveis trabalhos que poderão ser realizados futuramente.

2 CIRCUITOS ELETRÔNICOS PARA BATERIAS ÍON-LÍTIO

2.1 BATERIAS ÍON-LÍTIO

Células Íon-Lítio são dispositivos eletroquímicos que através do processo de oxidação e redução geram energia elétrica. A célula é composta por 4 partes internas principais (JOW et al., 2014), que são:

- **Anodo**, é o polo negativo, no qual sofre oxidação por perder elétrons, geralmente material utilizado é o grafite (Carbono);
- **Catodo**, é o polo positivo, no qual sofre redução por ganhar elétrons, deriva dependendo da química da célula, mas sempre é um composto formado por Lítio e outros elementos;
- **Eletrólito**, composto que contem sais de Lítio, para transferir íons de Lítio;
- **Separador**, material poroso, que permite a passagem dos íons de Lítio, isolando assim o catodo e o anodo.

Na Figura 1 é ilustrada a circulação dos íons de Lítio e elétrons para os processos de carga e descarga. Durante o processo de descarga, momento em que há corrente elétrica nos polos, íons de Lítio passam pelo eletrólito no sentido do anodo para o catodo. Este processo é realizado de forma contínua até o momento em que não haja mais íons de Lítio no anodo, ou seja, a célula está descarregada (SCHALKWIJK; SCROSATI, 2007). Ao inserir uma fonte de alimentação externa à célula ocorre o processo de carga, os íons de Lítio passam pelo eletrólito no sentido do catodo para o anodo. No momento em que não há presença de íons de Lítio no catodo a célula está completamente carregada.



Figura 1 – Processo de carga e descarga em Célula Íon-Lítio

Fonte: Autor.

Atualmente existem diferentes tipos de química para células Íon-Lítio (LI et al., 2018), que são utilizadas para determinadas aplicações, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das Baterias à base de Lítio

Química	Óxido de Lítio-Cobalto	Óxido de Manganês de Lítio	Óxido de Manganês de Níquel-Lítio	Fosfato de Lítio-Ferro
Abreviação	LCO	LMO	NMC	LFP
Fórmula	LiCoO_2	LiMn_2O_4	LiNiMnCoO_2	LiFePO_4
Tensão nominal (V)	3.60	3.70	3.60	3.20
Tensão carregada (V)	4.20	4.20	4.20	3.65
Tensão descarregada (V)	3.00	3.00	3.00	2.50
Tensão mínima (V)	2.50	2.50	2.50	2.50
Densidade energética (Wh/kg)	150–200	100–150	150–220	90-120
Ciclos	500-1000	300–700	1000–2000	1000–2000
Aplicações	Celulares, tablets, notebooks, câmeras	Ferramentas elétricas, dispositivos médicos	Veículos elétricos, indústria	Estacionária

Fonte: Autor.

A célula apresenta uma capacidade nominal, valor obtido pela multiplicação da corrente pelo tempo (Ah), mas esta capacidade sofre influência por diversos fatores como: alto número de ciclos de carga e descarga, utilização incorreta, temperatura de operação, taxa de descarga e etc (SAXENA et al., 2019).

A taxa de descarga (C) é utilizada para mensurar a corrente de carga e descarga de uma célula. Esta taxa é obtida através da corrente sobre a capacidade nominal da célula, exemplificando, uma célula com capacidade nominal de 2Ah, ao ser submetida a uma taxa de 0,5C, apresenta uma corrente de 1A. Caso a taxa fosse de 2C a corrente fluindo pela célula seria de 4A. A capacidade da bateria é inversamente proporcional a taxa de descarga, ou seja, quanto maior a taxa de descarga menor será a utilização da capacidade nominal da bateria (SAXENA et al., 2019), na Figura 2 é apresentado a curva de descarga de uma célula Íon-Lítio com variação da taxa de descarga.

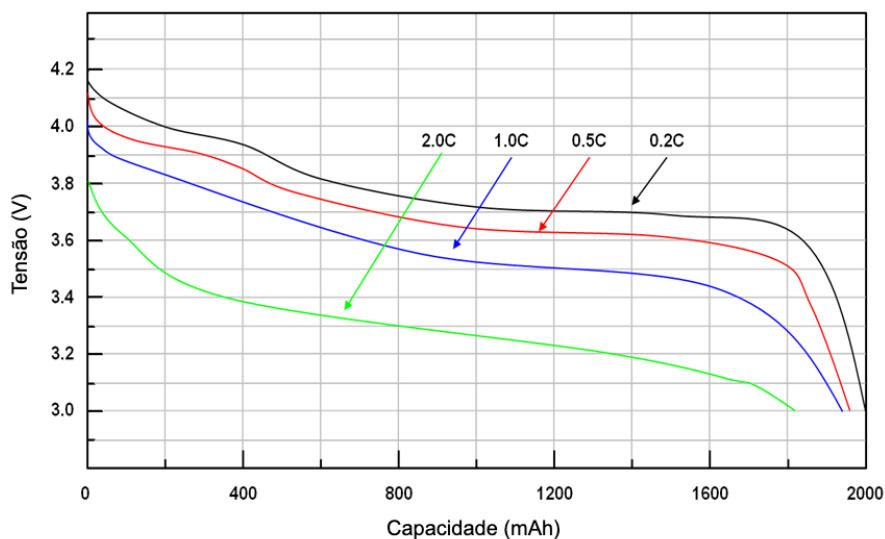


Figura 2 – Curva de descarga de célula Íon-Lítio

Fonte: Adaptado de (RICHTEK, s.d.)

Baterias são formadas por duas ou mais células (WINTER; BRODD, 2004). Estabelecendo as ligações entre células em série e/ou paralelo, é obtido na bateria o nível de tensão e corrente de acordo com o arranjo. Na Figura 3 são apresentados três arranjos que utilizam de células de Óxido de Lítio-Cobalto, cuja capacidade para este exemplo é de 2Ah e a tensão nominal é apresentada na Tabela 1.

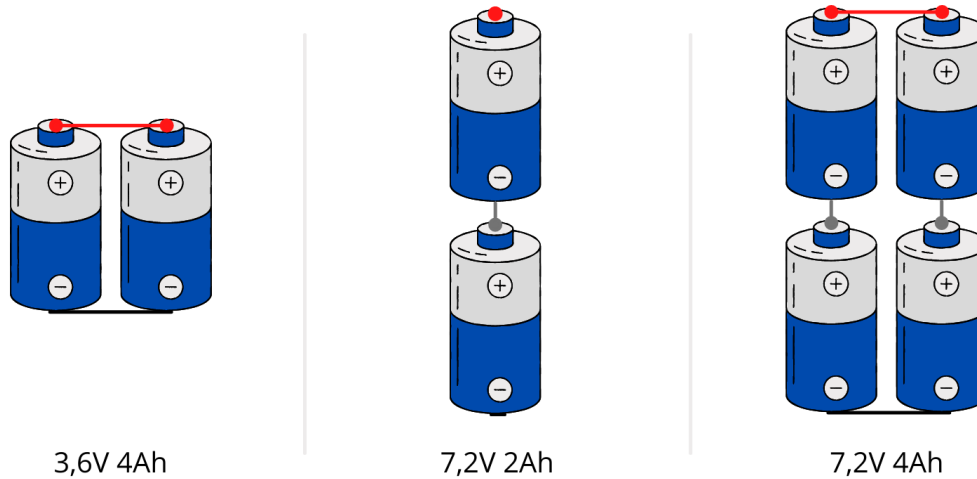


Figura 3 – Baterias com células de Óxido de Lítio-Cobalto de 3,6V 2Ah
Fonte: Autor.

Deve-se destacar que baterias Íon-Lítio não são formadas apenas por células, pois é necessário utilizar um sistema de gerenciamento de bateria (BMS - *Battery Management System*), fixadores (*holders*) e fita de níquel para fazer a conexão entre as células. Na Figura 4 é ilustrado o processo de uma célula Íon-Lítio até bateria por completo.

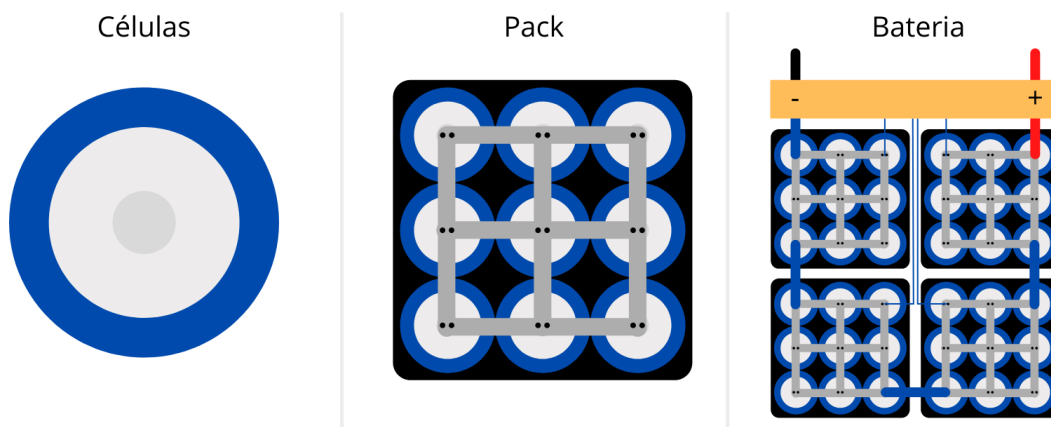


Figura 4 – Construção de uma bateria Íon-Lítio
Fonte: Autor.

Packs são arranjos de células ligados em paralelo que aumentam a capacidade sem elevar a tensão. As células por sua vez são fixadas no *holder* e são soldadas com a técnica de solda ponto, com uma fita de níquel. Os *packs* são interligados em série, de forma com que a tensão aumente e a capacidade se mantenha, além de serem conectados ao BMS (retângulo na cor laranja). O polo negativo do primeiro

pack é conectado ao BMS, para controlar a passagem da corrente, obtendo-se assim na saída os polos positivos e negativos da bateria.

2.1.1 Sistema de gerenciamento de bateria

Conforme apresentado na seção anterior, as baterias necessitam de um sistema eletrônico para controlar e gerenciar, também conhecido como BMS. Suas principais funções são: controlar carga e descarga, balanceamento, proteção contra curto-circuito e etc (BERGVELD; KRUIJT; NOTTEN, 2002).

O controle da carga e descarga é de extrema importância, pois as células apresentam tensão máxima e mínima, conforme apresentado na Tabela 1, na qual estes limites são controlados pelo BMS. O terminal negativo da bateria é controlado pelo BMS, interrompendo o passagem de corrente elétrica caso os limites sejam atingidos.

O balanceamento é o processo que tem como função manter os *packs* com a mesma diferença de potencial. (QI; LU, 2014). Devido ao fato dos *packs* estarem conectados em série, a queda de tensão não é uniforme em todos, dado que na prática as resistências internas podem variar.

A proteção contra curto-circuito é extremamente necessária, dado que as baterias Íon-Lítio podem entrar em combustão quando são submetidas a altas taxas de descarga e sobretensão.

No mercado existem diferentes fabricantes de BMS, com suas respectivas características. Entretanto é possível separar em dois tipos de BMSs, com e sem microcontrolador, suas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características dos modelos de BMS

Item	Não Microcontrolado	Microcontrolado
Controle de carga	✓	✓
Controle de descarga	✓	✓
Balanceamento	✓	✓
Proteção contra curto circuito	✓	✓
Proteção contra sobre carga	-	✓
Proteção contra alta temperatura	-	✓
Predição estado de carga	-	✓
Predição estado de vida	-	✓
Comunicação externa	-	✓
Custo	Baixo	Alto

Fonte: Autor.

As funções presentes no BMS não microcontrolado são suficientes para que a bateria funcione de forma segura, sendo possível utilizar equipamentos externos para realizar medições, monitorando remotamente a bateria.

2.1.2 Predição de estado de carga

Estado de carga (SoC - *State of Charge*) é o indicador que apresenta a quantidade restante de carga, se comparado à capacidade total da bateria (PANG et al., 2001), sendo uma métrica de extrema importância para estimar a capacidade restante ao longo dos ciclos de carga e descarga.

Existem diferentes formas de estimar o SoC da bateria, com métodos diretos ou indiretos (CHIASSON; VAIRAMOHAN, 2003) (algoritmos, Contagem de Coulomb, Filtro Extendido de Kalamn, redes neurais, etc). O método direto bastante utilizado é a Contagem de Coulomb (*Coulomb Counting*) (NG et al., 2009), no qual o estado de carga é obtido por meio de uma equação diferencial ordinária (PLETT, 2015):

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\frac{\eta(t)i(t)}{C_n} \quad (1)$$

em que $x(t)$ representa o estado de carga no instante de tempo t , i a corrente instantânea, C_n a capacidade nominal da bateria e η a eficiência coulombica. A eficiência para baterias Íon-Lítio pode ser considerada como 1, tanto para carga quanto para descarga. Integrando a Equação 1 em um intervalo de tempo conhecido, a mudança do estado de carga de uma bateria é dada por:

$$x(t) = x(t_0) - \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t \eta(\tau)i(\tau)d(\tau) \quad (2)$$

A Equação 2 caracteriza o método de forma contínua, entretanto para aplicações que realizam o SoC a todo instante se faz necessário a caracterização discreta no tempo. Assumindo que o intervalo de tempo entre amostras é dado por Δt , considerando $t_0 = k \Delta t$ e $t = (k + 1) \Delta t$, denotando $k \Delta t = [k]$, chega-se na expressão discreta da Contagem de Coulomb no domínio do tempo:

$$x[k + 1] = x[k] - \frac{\eta[k]i[k]\Delta t}{C_n} \quad (3)$$

A Contagem de Coulomb contabiliza a quantidade de corrente ao longo do tempo, obtendo assim a diferença de capacidade no intervalo de tempo medido. Para estimar o estado de carga é necessário conhecer a capacidade nominal e capacidade restante da bateria, antes da execução do algoritmo que realiza a Contagem de Coulomb.

Por se tratar de um método acumulativo, erros e imprecisões nas medidas de corrente aumentam ao longo do tempo, necessitando assim de calibração, para assim apresentar resultados precisos.

2.2 CIRCUITOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS

Circuito elétrico é uma interconexão de elementos elétricos (ALEXANDER; SADIKU, 2013), tais como resistores, indutores, capacitores, diodos, linhas de transmissão, fontes de tensão, fontes de corrente e interruptores, da forma em que haja ao menos um caminho fechado para a corrente elétrica. Em geral, os elementos são dispositivos com terminais que são completamente caracterizados pela corrente ou tensão através do elemento (IRWIN; NELMS, 2020).

Corrente contínua é uma corrente que permanece com a magnitude constante ao longo do tempo (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Engloba diversos circuitos elétricos em que o sentido das cargas é unidirecional (BOYLESTAD, 2013), estes circuitos são compostos por uma ou mais fontes de alimentação. Circuitos em corrente contínua utilizam resistores para realizar funções como controle de corrente e divisor de tensão. Para dimensionar estes circuitos utiliza-se a Lei de Ohm, na qual afirma que a tensão (v) em um resistor é diretamente proporcional à corrente (i) (ALEXANDER; SADIKU,

2013).

$$V = i * R \quad (4)$$

A resistência (R) de um elemento representa sua capacidade de resistir ao fluxo de corrente elétrica, é medida em ohms (Ω) (ALEXANDER; SADIKU, 2013), e implica na ocorrência do efeito Joule, no qual a energia elétrica é convertida em energia térmica.

2.2.1 Circuito de proteção contra tensão reversa

Pode-se acrescentar um diodo na entrada de um circuito em corrente contínua, para impedir que a fonte de alimentação seja na direção contrária. Diodos são dispositivos não lineares, a razão está em sua barreira de potencial. Quando a tensão no diodo é menor que a barreira de potencial a corrente é proveniente de portadores minoritários, e portando baixa, já quando a tensão é maior que a barreira de potencial a corrente aumenta rapidamente, sendo proveniente de portadores majoritários na junção PN (MALVINO; BATES, 2011). Seu comportamento permite a passagem de corrente em apenas uma direção, do anodo (n) para o catodo (p). Na Figura 5 são apresentados dois circuitos, o circuito a esquerda é alimentado por uma fonte de tensão que polariza o diodo diretamente, já o circuito da direita é alimentado por uma fonte de tensão no sentido de polarização reversa.

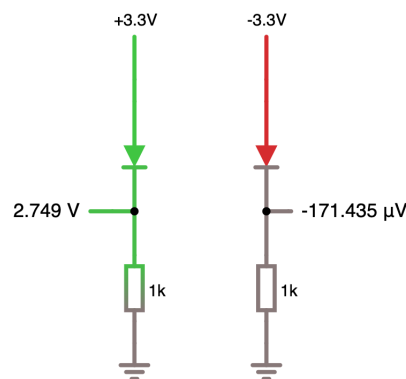


Figura 5 – Diodo como proteção de inversão de polaridade

Fonte: Autor.

2.2.2 Divisor de tensão

O circuito é composto por associação de resistores em série, geralmente utilizado dois, a mesma corrente (i) flui em ambos (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Na Figura 6 é apresentado um divisor de tensão com resistores em série ($R1$ e $R2$) e uma tensão de entrada ($V_{entrada}$), aplicando a Lei de Ohm é obtido as seguintes equações:

$$i_1 = i_2 \quad (5)$$

$$V_{entrada} = i * R = i * (R1 + R2) \Rightarrow i = \frac{V_{entrada}}{R1 + R2} \quad (6)$$

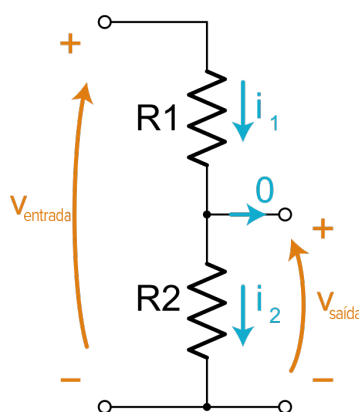


Figura 6 – Divisor de Tensão
Fonte: (MCALLISTER, s.d.).

Em seguida, é aplicada a Lei de Ohm no circuito da tensão de saída, obtendo a seguinte equação:

$$V_{saída} = i * R = i * R2 \quad (7)$$

Substituindo a equação 6 na equação 7 é encontrado a expressão que descreve o divisor de tensão:

$$V_{saída} = \left(\frac{V_{entrada}}{R1 + R2} \right) * R2 \Rightarrow V_{saída} = V_{entrada} * \frac{R2}{R1 + R2} \quad (8)$$

2.3 MICROCONTROLADORES

Microcontroladores são circuitos integrados compostos por microprocessador integrado às memórias, assim como aos diversos periféricos presentes no circuito (IBRAHIM, 2006), tais como Conversores Analógico-Digital (ADC - *Analog-Digital Converter*), GPIOs (*General Purpose Input/Output*), contadores e interfaces de comunicação (UART, SPI, I2C e etc...). Geralmente há uma memória não volátil para salvar dados, inclusive o programa de execução do microcontrolador, e uma memória RAM para armazenar as variáveis durante execução. Na Figura 7 é apresentada a arquitetura do microcontrolador ESP32, na qual é possível visualizar de forma clara todos seus periféricos e recursos.

2.3.1 Conversor analógico-digital

São conversores que transformam sinais analógicos, contínuos no domínio do tempo, em sinais digitais. Essa conversão utiliza a técnica de Modulação por Código de Pulso (PCM - *Pulse Code Modulation*). Na Figura 8 é apresentado em diagrama de blocos o processo de conversão, utilizando das técnicas de amostragem, quantificação e codificação (IBRAHIM, 2006).

Amostragem é o processo que converte sinais contínuos no domínio do tempo, em sinais discretos no domínio do tempo. É realizado o chaveamento do sinal, com uma taxa de n Hz de acordo com o ADC.

Quantificação é o processo que converte sinais com amplitude contínua, em sinais com amplitude discreta. O intervalo de tensão é dividido em níveis de tensão, em que a quantidade de níveis é de 2^n , n

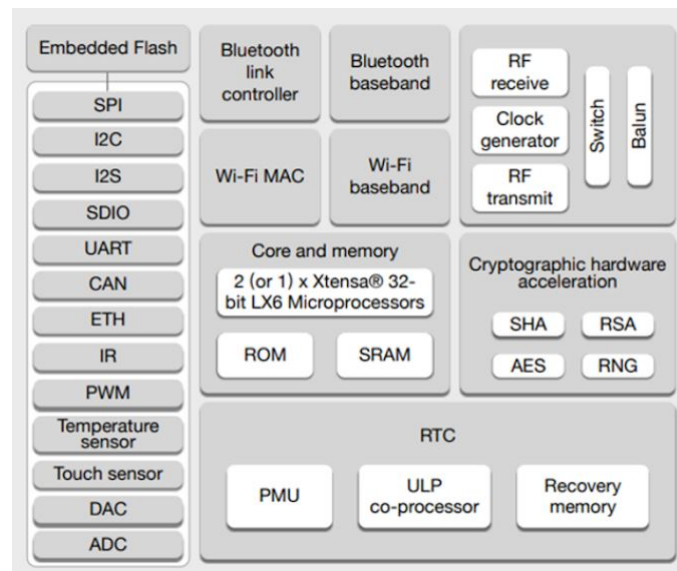


Figura 7 – Arquitetura do ESP32

Fonte: Folha de dados do ESP32

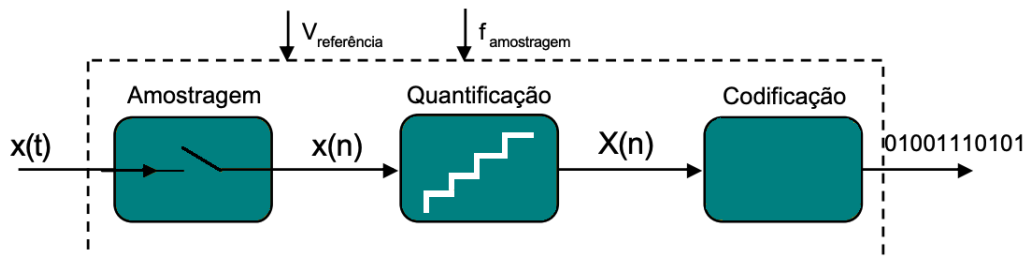


Figura 8 – Diagrama de blocos ADC

Fonte: Autor.

é o número de bits do ADC. A conversão do valor pode ser arredondado ou truncado.

Codificação é o processo que converte os níveis de tensão em bits, transformando um sinal analógico de amplitude e tempo discretos e um sinal digital, podendo este ser série ou paralelo.

Para demonstrar o funcionamento do conversor analógico-digital é utilizado um ADC de 3 bits. Na Figura 9 é apresentado o sinal analógico $x(t)$ que é conectado a entrada do ADC.

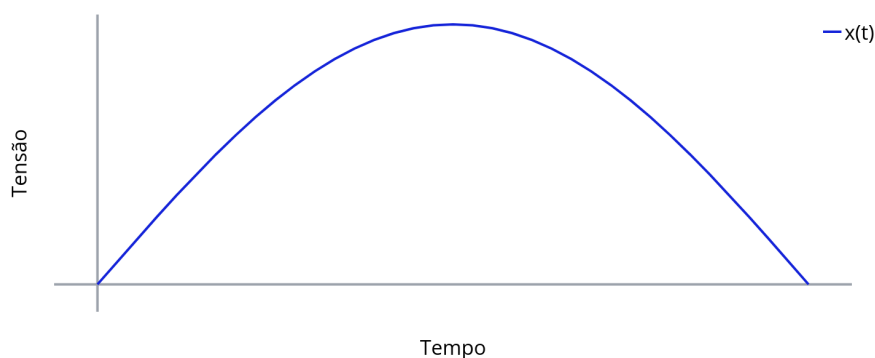


Figura 9 – Sinal analógico contínuo no domínio do tempo

Fonte: Autor.

É realizado o processo de amostragem no sinal $x(t)$, resultando na conversão de sinal analógico

para sinal discreto $x(n)$, representado na Figura 10

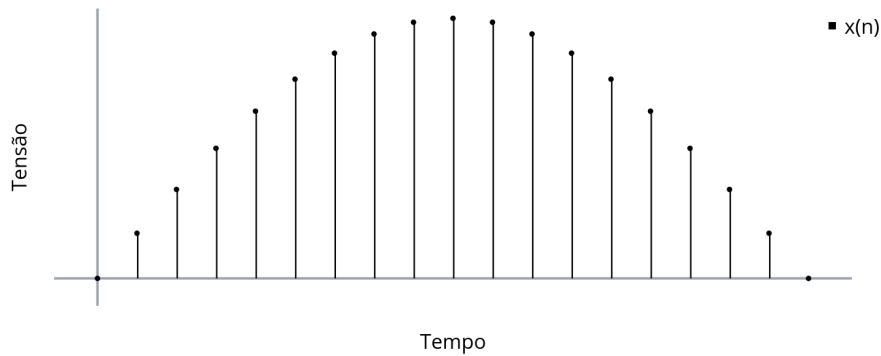


Figura 10 – Sinal discretizado após passar pela amostragem
Fonte: Autor.

O sinal $x(n)$ é quantizado, resultando em $X(n)$, conforme é apresentado na Figura 11.

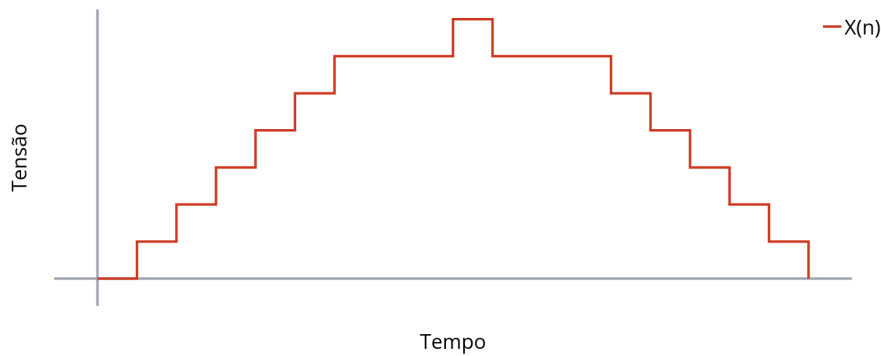


Figura 11 – Sinal quantizado após passar pela quantização
Fonte: Autor.

Na Figura 12 é utilizado o sinal quantizado $X(n)$ para facilitar a visualização da codificação, convertendo o sinal quantizado em digital. Entretanto na saída do ADC são enviados apenas bits, na qual as tensões para os bit 0 e bit 1 dependem da tensão de operação do ADC

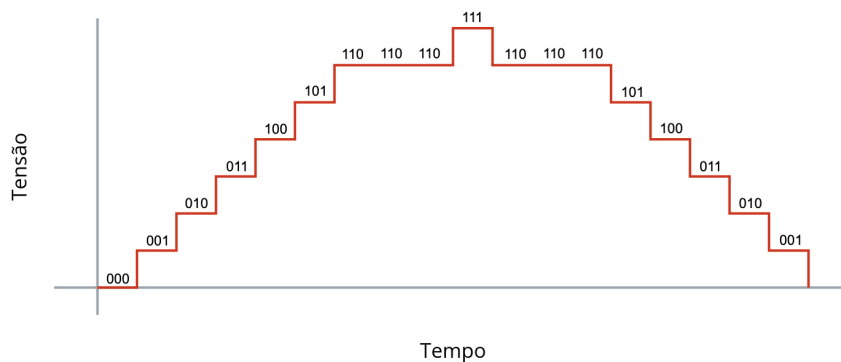


Figura 12 – Sinal digital após passar pela codificação
Fonte: Autor.

Na Figura 13 são apresentados os sinais das conversões ($x(n)$ e $X(n)$) e o sinal de entrada ($x(t)$).

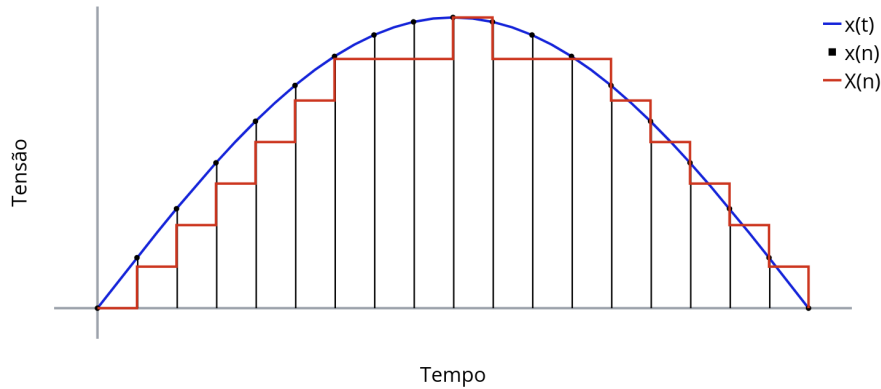


Figura 13 – Sinais durante a conversão do ADC

Fonte: Autor.

2.4 REDES DE COMPUTADORES

2.4.1 Modelo OSI

Este modelo é baseado na proposta desenvolvida pela ISO (*International Standards Organization*) para ser a primeira etapa em direção a padronização internacional de protocolos nas diversas camadas (DAY; ZIMMERMANN, 1983), sendo revisto em 1995 (DAY, 1995). O modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) é dividido em sete camadas. Na Figura 14 são apresentadas as camadas do modelo.



Figura 14 – Camadas do Modelo OSI

Fonte: Autor.

Segundo (FOROUZAN, 2009), o princípio de cada camada é descrito da seguinte forma:

- **Física** - A camada que trata da transmissão de bits, ou seja 0 ou 1, por um canal físico de comunicação. Esta camada deve garantir que ao ser enviado um bit 1, o lado que receber deverá ter um bit 1. Neste caso, são geralmente associados níveis de tensão, como exemplo, 0 e 5V para representar o bit 0 e bit 1 respectivamente. É nesta camada definida a taxa de transmissão, direção da comunicação, assim como a abertura e encerramento da comunicação. Se trata da camada responsável por transmitir a informação pelo meio físico;

- **Enlace** - A camada é capaz de detectar e corrigir erros da camada física, se existirem, além de fornecer à camada de rede a capacidade de controlar o chaveamento de circuitos. Sua principal função é gerenciar os quadros, os quais podem ser perdidos, duplicados ou danificados. Nesta camada é realizado o controle de fluxo de informações, fazendo com que um transmissor não envie a uma taxa em que o receptor não consiga receber. Além de realizar o controle de acesso ao meio (MAC - *Media Access Control*), utilizada para realizar o controle de acesso aos canais de transmissão;
- **Rede** - A camada agrupa protocolos de operações da rede, tais como algoritmos de roteamento e de controle de congestionamento. Sua função é de enviar os pacotes da origem ao destino, utilizando a melhor rota, e assim necessitando utilizar nós intermediários, quando a origem e destino estão em redes diferentes. Portanto se faz necessário esta camada "conhecer" a topologia da sub-rede, sendo de responsabilidade desta camada a compatibilidade entre diferenças de endereçamento, tamanho do pacote e protocolos diferentes. Nesta camada o protocolo de internet (IP - *Internet Protocol*) é utilizado amplamente para encaminhamento dos dados na rede;
- **Transporte** – A camada é responsável por controlar o transporte de dados entre a origem e o destino, isto é, fim-a-fim, para que o serviço de transporte atinja sua totalidade. O propósito da camada é de fornecer o serviço de transferência transparente de dados (fim-a-fim) entre entidades da camada de sessão. A complexidade das funções nesta camada é dependente da qualidade do serviço da camada de rede, se a conexão oferecida pela camada da rede for confiável e econômica, as funções necessárias na camada de transporte serão proporcionalmente reduzidas. Nesta camada o protocolo de controle de transmissão (TCP - *Transmission Control Protocol*) utiliza o conceito de porta, associada geralmente a um serviço na camada de aplicação;
- **Sessão** - A camada deve organizar e sincronizar o diálogo, gerenciando a troca de dados entre entidades da camada de apresentação. Esta camada é dividida em dois serviços, o primeiro sendo o "Serviço de Administração da Sessão" que é a autenticação entre a origem e destino, conhecido como *Login* e *Logout*. O segundo é o "Serviço de Diálogo de Sessão" que controla e estabelece a forma de troca de informações, sendo estas podendo ser *half-duplex*, *full-duplex* e etc...
- **Apresentação** - A camada tem como função a codificação dos dados para o padrão que será passado para a camada de aplicação. Nesta camada também é realizada a criptografia e descryptografia dos dados, além da compressão e descompressão, para assim diminuir o tamanho dos dados e conseqüentemente diminuindo a latência de transmissão e reduzindo congestionamento com este processo.
- **Aplicação** - A camada mais alta do modelo OSI, na qual é possível visualizar os dados dependendo do tipo de protocolo que está sendo utilizado, ocorrendo toda a troca de informação para os dispositivos conectados. Aplicações são serviços que utilizam diferentes protocolos para o fornecimento dos dados.

2.4.2 Modelo TCP/IP

O modelo TCP/IP é baseado no modelo OSI, no qual consiste em 4 camadas. Na Figura 15 são apresentadas as camadas deste modelo. O nome do modelo é composto por dois protocolos, o TCP (*Transmission Control Protocol* - Protocolo de Controle de Transmissão), é o protocolo utilizado na camada de transporte. O IP (*Internet Protocol* - Protocolo de Internet) é o protocolo utilizado na camada de Internet, conhecida como camada de rede no modelo OSI. As camadas física e de enlace no modelo OSI passaram a ser apenas uma camada, a camada de Interface de Rede. Na camada de rede foi realizado apenas a troca da nomenclatura, passando a se chamar Internet. Entretanto, as três últimas camadas do modelo OSI, sendo estas: Sessão, Apresentação e Aplicação, são caracterizadas como apenas a camada de Aplicação (KUROSE; ROSS, 2006).

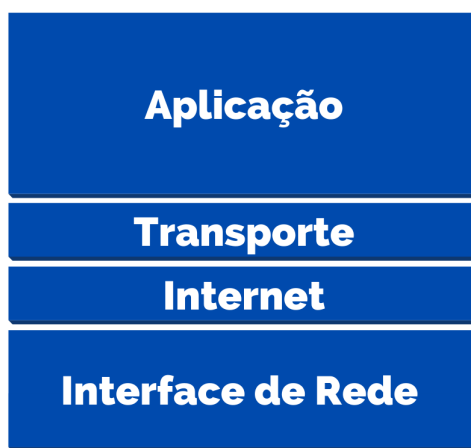


Figura 15 – Camadas do Modelo TCP/IP

Fonte: Autor.

2.4.3 WiFi IEEE 802.11

IEEE 802 é composto por padrões técnicos para redes locais (LAN - *Local Area Network*), no qual o padrão para redes sem fio é o IEEE 802.11. É utilizado para especificar o conjunto de protocolos de controle de acesso ao meio (MAC - *Media Access Control*) e de camada física para implementação de comunicação sem fio em rede local (WLAN - *Wireless Local Area Network*) (TANENBAUM, 2003). Utilizado na camada física do modelo OSI, no modelo TCP/IP está na camada de interface de rede. Os dispositivos móveis, como celulares, *notebooks*, assim como dispositivos inteligentes (IoT - *Internet of Things*) utilizam de redes sem fio para se comunicar à *Internet*. O IEEE 802.11 é composto por vários padrões, que apresentam diferenças entre a frequência de operação, tipo de modulação, largura de banda e taxa de transferência (TANENBAUM, 2003). Na tabela 3 são apresentados alguns padrões, com suas respectivas especificações.

2.4.4 Protocolo HTTP

O protocolo de transferência de hipertexto (HTTP - *HyperText Transfer Protocol*) é utilizado em toda a *World Wide Web*, este protocolo especifica como as mensagens devem ser escritas para que os clientes e servidores possam se comunicar de forma íntegra e concisa (TANENBAUM, 2003).

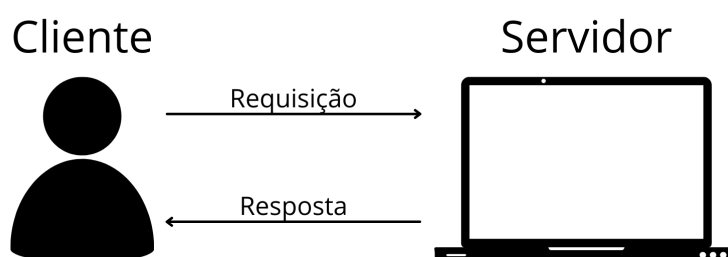
Tabela 3 – Padrões IEEE 802.11

Padrão	Taxa de Transferência (Mbps)	Frequência (GHz)	Modulação
802.11	2	2,4	FHSS ou DSSS
802.11b	11	2,4	DSSS
802.11a	54	5	OFDM
802.11g	54	2,4	OFDM
802.11n	600	2,4 ou 5	MIMO-OFDM

Fonte: Autor.

As chamadas HTTP são denominadas requisições, que ocorrem da forma representada na Figura 16. O cliente envia uma requisição para o servidor, que retorna uma resposta.

Figura 16 – Chamada HTTP



Fonte: Autor.

A requisição realizada pelo cliente é apresentada na Figura 17 e suas características apresentadas na Tabela 4. No exemplo que será apresentado o cliente deseja realizar uma gravação de dados no servidor, estes dados serão enviados na forma de JSON (*JavaScript Object Notation*), na qual os dados são organizados de forma legível a humanos no formato atributo-valor. O servidor está localizado no próprio cliente na porta 8000.

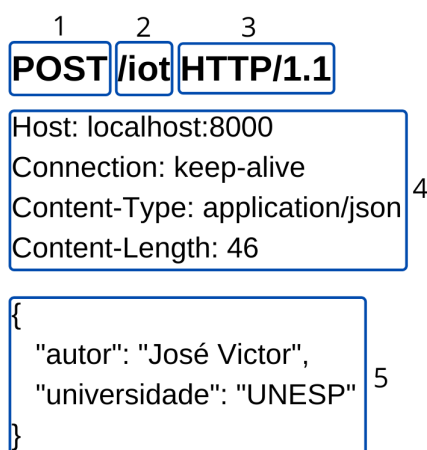


Figura 17 – Requisição HTTP

Fonte: Autor.

A resposta enviada pelo servidor é apresentada na Figura 18 e suas características apresentadas na Tabela 5. No exemplo que será apresentado o servidor responde a solicitação do cliente que deseja

Tabela 4 – Requisição HTTP

Índice	Nome	Descrição
1	Método	Tipo de ação da requisição
2	Caminho	Rota da requisição dentro do servidor
3	Versão	Versão do protocolo utilizada
4	Cabeçalho	Informações do tipo de conexão, mensagem e dados do protocolo
5	Corpo	Dados são passados no tipo especificado no cabeçalho

Fonte: Autor.

salvar dados. Os dados foram criados e o servidor retorna os dados criados junto com o identificador do registro.

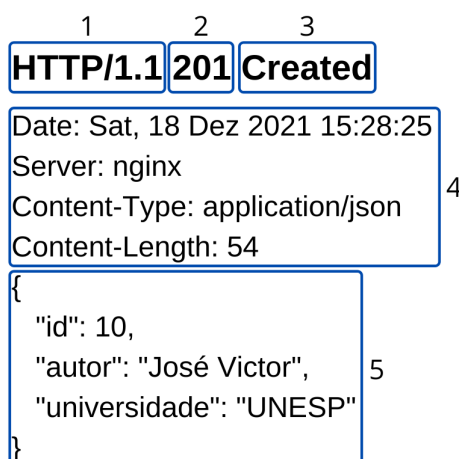


Figura 18 – Resposta HTTP

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Resposta HTTP

Índice	Nome	Descrição
1	Versão	Versão do protocolo utilizado
2	Código	Código de resposta para indicar o que foi realizado
3	Mensagem	Mensagem padrão de resposta obtida através do código
4	Cabeçalho	Informações do servidor e da resposta
5	Corpo	Dados que foram requisitados pelo cliente

Fonte: Autor.

O protocolo apresenta 9 métodos, cada um com sua função (MOZILLA, s.d.), os métodos mais utilizados são os seguintes:

- **GET** - Utilizado para fazer consultas ao servidor, neste métodos não é possível passar dados pelo corpo da requisição, dado que é um método de consulta de dados;
- **POST** - Utilizado para salvar dados ainda não existentes no servidor, neste método é adotado a passagem dos dados pelo corpo da requisição;
- **PUT** - Utilizado para atualizar dados já salvos no servidor;
- **DELETE** - Utilizado para excluir dados já salvos no servidor.

O protocolo utiliza de códigos de resposta para tratar as respostas de forma ágil e organizada. A Tabela 6 apresenta os intervalos de cada um dos tipos de respostas. São popularmente utilizado os seguintes códigos:

- 200 - *Ok*, sucesso na requisição;
- 201 - *Created*, dados criados e salvos;
- 301 - *Moved Permanently*, redireciona o cliente para outro destino;
- 400 - *Bad Request*, o cliente enviou uma requisição incorreta;
- 401 - *Unauthorized*, o cliente deve se autenticar para ter acesso a este recurso;
- 404 - *Not Found*, recurso solicitado não encontrado;
- 500 - *Internal Server Error*, o servidor encontrou uma situação na qual não consegue responder.

Tabela 6 – Códigos de Resposta HTTP

Código	Descrição	Faixa
1xx	Respostas de informação	100-199
2xx	Respostas de sucesso	200-299
3xx	Redirecionamento	300-399
4xx	Erros do cliente	400-499
5xx	Erros do servidor	500-599

Fonte: Autor.

3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Nesse capítulo será apresentado as configurações e especificações do projeto, sensores e circuitos integrados, assim como os *softwares* e ferramentas utilizados durante o desenvolvimento do sistema.

3.1 ESPECIFICAÇÕES DA BATERIA

O dispositivo foi projetado para ser capaz de monitorar baterias que operam nas faixas apresentadas na Tabela 7, a tensão foi projetada para ser capaz de monitorar baterias de com 3 séries (3V cada série na tensão mínima) até duas baterias de 24V em série, que são compostas por um total de 14 séries (4,2V cada série na tensão máxima).

Tabela 7 – Faixas de Operação

Propriedade	Mínimo	Máximo	Unidade
Tensão	9,0	58,8	V
Corrente	-200,0	200,0	A
Temperatura	0,0	50,0	°C

Fonte: Autor.

3.2 SENSORES

Para aquisição dos dados de corrente e temperatura serão utilizados dois sensores. O sensor de corrente é importado, e o sensor de temperatura pode ser encontrado facilmente no mercado nacional.

A corrente que será monitorada é elevada, tornando-se arriscado realizar medições diretas e invasivas, acarretando em possíveis acidentes durante a instalação. Para isso, foi utilizado um sensor de efeito Hall, estes sensores são transdutores lineares usados para medir a magnitude do campo magnético, no qual a tensão de saída é diretamente proporcional à magnitude do campo magnético e conseqüentemente à corrente (XIAO et al., 2003). O sensor utilizado no projeto foi o HSTS016-200A, da fabricante chinesa YHDC. O modelo escolhido apresenta as seguintes especificações:

Tabela 8 – Sensor de corrente HSTS016-200A

Parâmetro	Valor
Tensão de alimentação	5,0V
Corrente de leitura	±200,0A
Largura de banda	DC 25kHz
Tensão de saída	2,5 ± 0,625V
Tensão de referência	2,5V

Fonte: Adaptado da folha de dados do sensor HSTS016.

Na Figura 19 é apresentado o sensor utilizado no projeto. Para atender os critérios do sistema, foi necessário utilizar este sensor de 200A para monitorar baterias com potência de carga e descarga de até 10kW.



Figura 19 – Sensor de corrente HSTS016-200A

Fonte: Folha de dados do sensor HSTS016.

A temperatura da bateria operando em condições normais (20 a 40°C), possibilita a utilização de sensores para uso geral para realizar medidas precisas. No projeto foi escolhido o sensor térmico do tipo NTC, termistores que apresentam variações na sua resistividade interna, dependendo da variação de temperatura (BEAKLEY, 1951). A relação entre resistência elétrica e a temperatura são mensuráveis e fornecidos pelo fabricante do sensor, apresentando uma boa tolerância e precisão. O termistor utilizado foi de 10kΩ. Sua relação entre resistência e temperatura é apresentada na Figura 20. A resistência é de 28,16 e 4,086kΩ para 0 e 50°C, respectivamente.

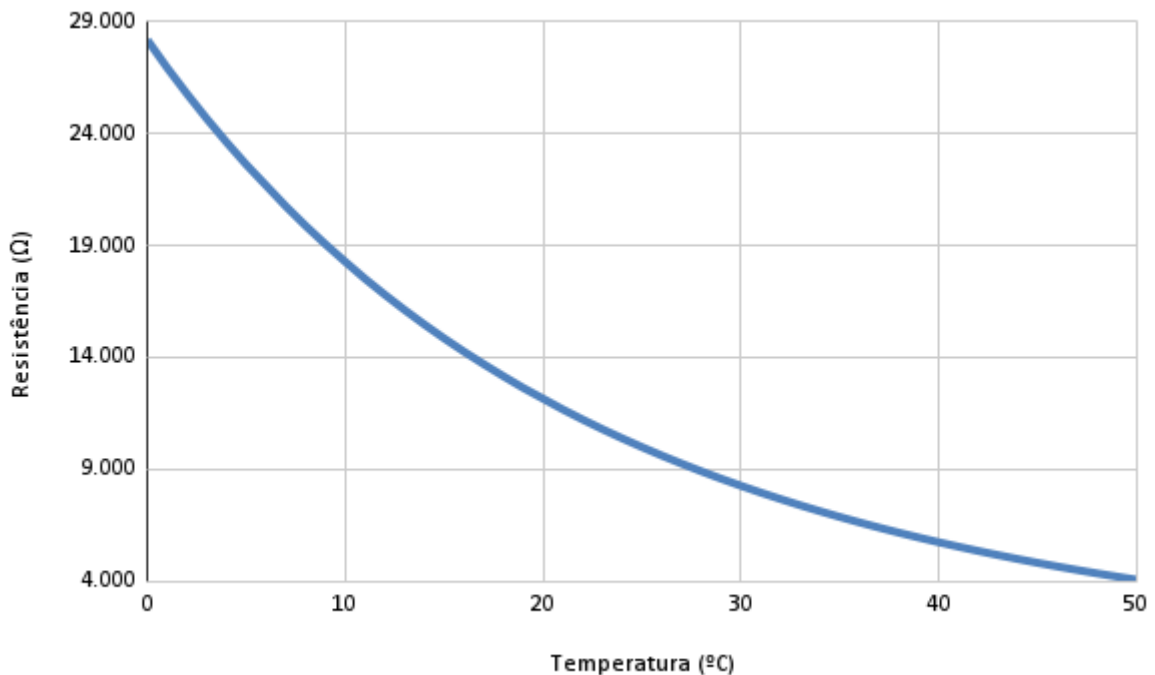


Figura 20 – Termistor NTC 10kΩ

Fonte: Adaptado da folha de dados do termistor NTC 10kΩ.

3.3 CIRCUITOS INTEGRADOS

Os circuitos integrados utilizados no projeto consistem no microcontrolador e no conversor de tensão

O microcontrolador escolhido foi o ESP32, um circuito integrado e módulo da fabricante chinesa Espressif, cujo produto é uma solução de baixo custo que permite criar dispositivos que necessitem de interface Wi-Fi e/ou Bluetooth. Os principais recursos utilizados do microcontrolador são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 9 – Microcontrolador ESP32

Interface	Quantidade	Tipo
Conversor Analógico-Digital	18	12 bits
GPIO	32	Digital
Wi-Fi	1	IEEE 802.11 b/g/n

Fonte: Adaptado da folha de dados do ESP32.

Para o projeto foi utilizado o kit de desenvolvimento (ESP32 devkit v1), na Figura 21 é apresentado o microcontrolador utilizado. A placa é composta pelo microcontrolador ESP32, regulador de tensão AMS1117, conversor USB-Serial, LED e botões para realizar a gravação do código na memória e reiniciar o microcontrolador. O regulador de tensão utilizado é do tipo linear e é baseado em um dispositivo ativo ou passivo, como diodos zener, que operam em uma determinada região (MALVINO; BATES, 2011). O AMS1117 tem como especificação a tensão de entrada entre 5 e 12V, afim de obter na saída a tensão regulada em 3,3V.

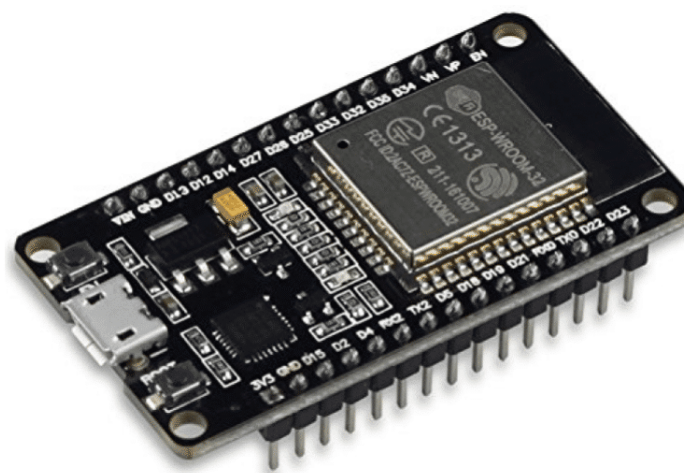


Figura 21 – Microcontrolador ESP32-DevKit-v1

Fonte: (EMBARCADOS, s.d.)

A tensão da bateria será utilizada para alimentar o circuito eletrônico, para isso será necessário regular a tensão da bateria para 5V. O regulador presente na placa de desenvolvimento não é capaz de regular a tensão que a bateria pode oferecer, conversores DC-DC do tipo *Step-Down* são ideais para aplicações que necessitam regular tensões altas para valores baixo, pois devido ao fato de utilizarem PWM (*Pulse Width Modulation*), apresentam menor dissipação de calor (MALVINO; BATES, 2011). O circuito integrado utilizado é o LM2576HV da fabricante Texas Instruments. As características do conversor são apresentas na tabela a seguir.

Tabela 10 – Circuito Integrado LM2576HV

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada	5 a 60V
Tensão de saída ajustável	1,5 a 26V
Corrente de saída	2A (nominal) e 3A (máximo)
Frequência de chaveamento	52kHz

Fonte: Adaptado da folha de dados do LM2576HV

3.4 SOFTWARES E FERRAMENTAS

3.4.1 Design de circuitos eletrônicos

O *software* utilizado para desenvolvimento do circuito elétrico e elaboração do design da PCB foi o KiCad, *software* de código aberto. Este *software* foi utilizado para gerar os circuitos, layout da PCB e imagens 3D do projeto.

3.4.2 Programação do *firmware*

A plataforma utilizado para criação e implementação do código no microcontrolador foi a Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), na qual é possível compilar e carregar códigos escritos em C e C++ no microcontrolador. O ESP32 pode ser programado nesta IDE, utilizando bibliotecas disponibilizadas pela fabricante do microcontrolador. Para realizar requisições HTTP foi utilizada a biblioteca "HTTPClient.h", desenvolvida por Markus Sattler.

3.4.3 Programação do servidor e supervisor

A IDE utilizada para o desenvolvimento do servidor e supervisor foi o Visual Studio Code. A interface de programação de aplicações (API - *Application Programming Interface*) foi desenvolvida em Node.js, utilizando a ferramenta "Express.js". Os dados trafegados pelo API são armazenados em um banco de dados relacional, neste caso foi utilizado o MySQL, na qual a biblioteca "sequelize" foi utilizada na API, para gerar sintaxes na linguagem SQL.

O supervisor foi desenvolvido em HTML, CSS e javascript, utilizando a biblioteca "jQuery" para manipulação de elementos da página. Também foi utilizado a biblioteca "Bootstrap" e a biblioteca "Chart.js" para exibição dos gráficos.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 ANÁLISE DO CONVERSÃO ANALÓGICO-DIGITAL

Ao realizar testes iniciais foi possível observar que o ADC do microcontrolador não apresenta uma resposta linear, assim como se pode analisar na Figura 22 a leitura realizada pelo ADC e pelo multímetro. Para a realização da obtenção dos dados foi necessário a utilização de um multímetro Minipa ET-1507B (modelo true RMS AC+DC), e dois microcontroladores ESP32, o primeiro para gerar tensão em corrente contínua por um canal PWM. O segundo foi para realizar a leitura do ADC. O sinal PWM gerado possui resolução de 12 bits (0 a 4095) com pulsos binários que assumem 0 ou 3.3V, de forma que cada incremento unitário nos bits de entrada deve ser equivalente a uma diferença de 0,805mV. Foi realizada uma varredura em toda faixa de tensão, cujo os dados obtidos do ADC e do multímetro eram registrados, o valor obtido no multímetro foi considerado como o valor real de tensão.

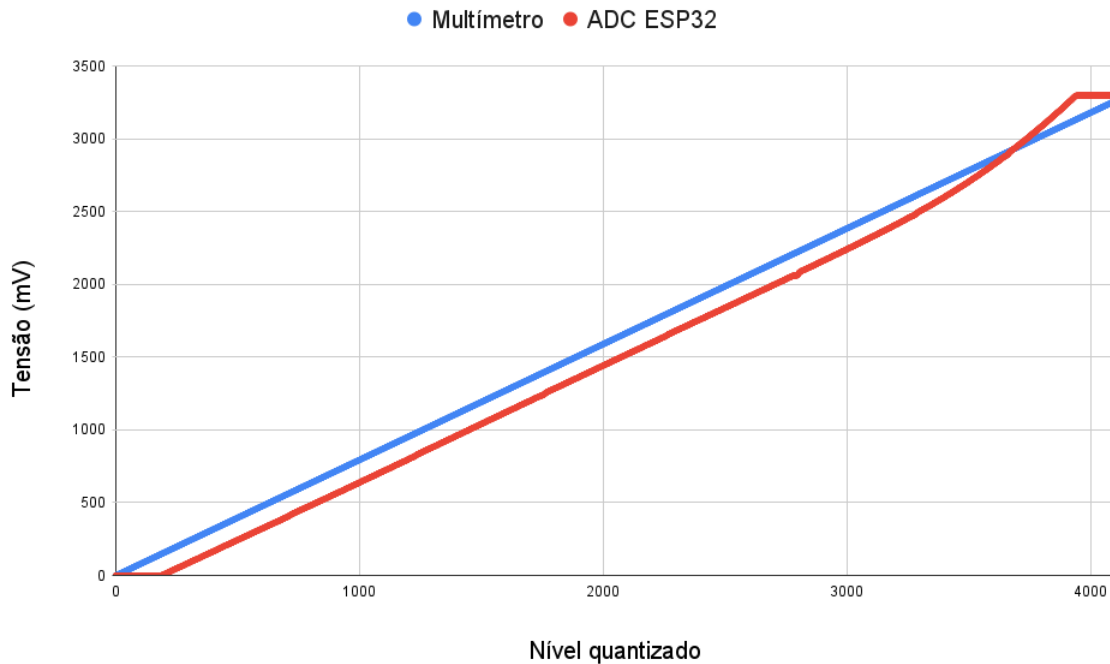


Figura 22 – Resposta do ADC e multímetro

Fonte: Autor.

Ao analisar as extremidades da faixa de operação do ADC (valores próximos a 0 e 3,3V), o conversor apresentou uma leitura constante e incorreta, ou seja, impossível de obter a tensão nesses pontos. Foi elaborado, a partir desses dados, um gráfico representando o erro do conversor em relação ao multímetro em toda a faixa de operação, exibidos na figura a seguir.

O conversor apresenta resposta aproximadamente linear no intervalo de 0,2 a 2,5V. Apesar de apresentar alguns pontos em que há uma variação brusca da leitura do ADC, deverão ser realizadas médias das leituras obtidas, diminuindo assim a variação nesses pontos.

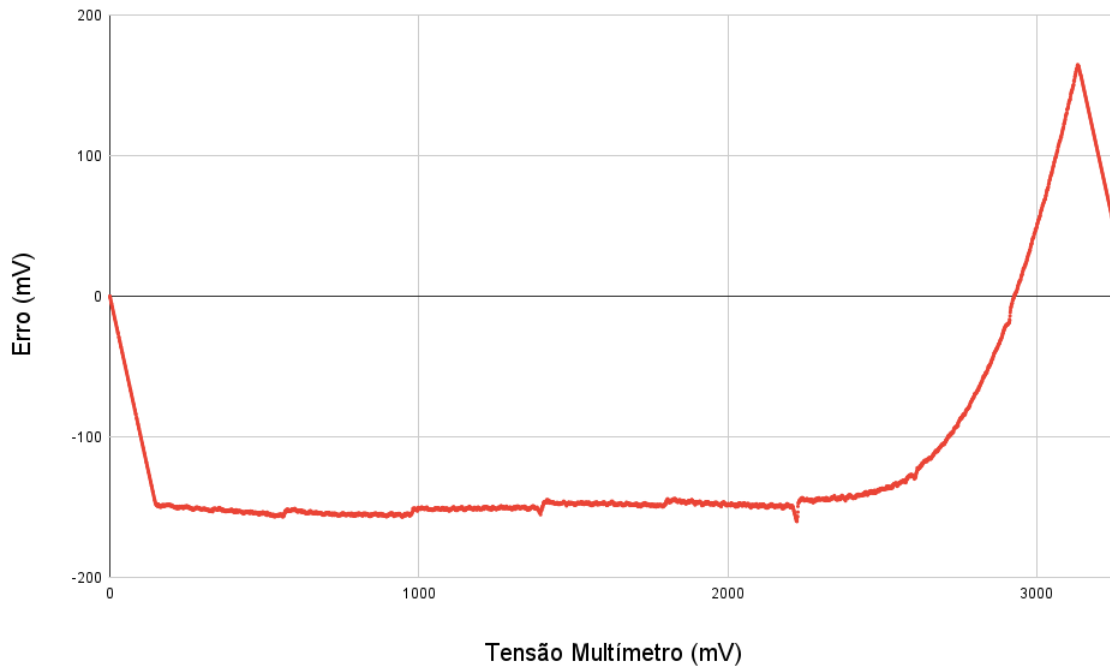


Figura 23 – Erro ADC em comparação ao Multímetro
Fonte: Autor.

4.2 DIMENSIONAMENTO DOS CIRCUITOS

Para aferir os valores dos sensores, foi necessário projetar circuitos de divisão de tensão que aproveitem a faixa de resposta adequada do ADC. Foram realizados 4 circuitos: um para leitura da tensão da bateria, dois para o sensor de corrente e um para o termistor.

A faixa de tensão da bateria foi apresentada na Tabela 7. Para obter alta precisão na medida, foi necessário utilizar o maior intervalo possível de leitura do ADC. Na equação 1 são apresentados os cálculos para encontrar o valor de R2 considerando uma resistência de 1kΩ em R1.

$$R1 \geq R2 * \frac{(V_{maxBateria} - V_{maxADC})}{V_{maxADC}} \geq 1 * \frac{58,8 - 2,5}{2,5} \geq 22,52k\Omega \quad (1)$$

O valor comercial de resistor mais próximo encontrado é de 24kΩ, para esta resistência a leitura de tensão da bateria irá variar entre as tensões encontradas a seguir:

$$V_{IO36Max} = V_{batMax} * \frac{R2}{R1 + R2} = 58,8 * \frac{1}{24 + 1} = \frac{58,8}{25} = 2,352V \quad (2)$$

$$V_{IO36Min} = V_{batMin} * \frac{R2}{R1 + R2} = 9 * \frac{1}{24 + 1} = \frac{9}{25} = 0,360V \quad (3)$$

Os valores de tensão das equações 2 e 3 estão dentro da faixa linear de leitura dos conversores ADC, discutida anteriormente.

O sensor de corrente deve ser capaz de ler corrente em dois sentidos (carga e descarga). Sendo assim, é necessário posicionar o ponto de leitura de corrente nula próximo ao ponto médio do segmento linear da curva do conversor ADC, e verificar que as leituras de ±200A estão dentro da região

estabelecida. Na equação 4 são apresentados os cálculos para encontrar o valor de R3, considerando uma resistência de 10kΩ em R4.

$$R3 \geq R4 * \frac{(V_{maxSensorCorrente} - V_{maxADC})}{V_{maxADC}} \geq 10 * \frac{3,125 - 2,5}{2,5} \geq 2,5k\Omega \quad (4)$$

O valor comercial de resistor mais próximo encontrado é de 2,7kΩ, para esta resistência a leitura de tensão de saída do sensor irá variar entre as tensões encontradas a seguir:

$$V_{IO39Max} = V_{sensorCorrenteMax} * \frac{R4}{R3 + R4} = 3,125 * \frac{10}{2,7 + 10} = \frac{31,25}{12,7} = 2,460V \quad (5)$$

$$V_{IO39Zero} = V_{sensorCorrenteZero} * \frac{R4}{R3 + R4} = 2,5 * \frac{10}{2,7 + 10} = \frac{25}{12,7} = 1,968V \quad (6)$$

$$V_{IO39Min} = V_{sensorCorrenteMin} * \frac{R4}{R3 + R4} = 1,875 * \frac{10}{2,7 + 10} = \frac{18,75}{12,7} = 1,476V \quad (7)$$

Os valores de tensão das equações 5, 6 e 7 estão dentro da faixa linear de leitura dos conversores ADC, discutida anteriormente.

O sensor de corrente apresenta duas saídas: uma para a corrente real, uma para a corrente de referência (0A). Para cada uma dessas entradas foi considerado um divisor de tensão, idênticos entre si e com valores de resistência coerentes aos calculados na equação 4.

O termistor apresenta resistência variável dependente da temperatura, conforme apresentado na Seção 3.2 na página 30. O circuito divisor de tensão é alimentado pela fonte de 3,3V do próprio microcontrolador, e é utilizado em série com um resistor de 10kΩ, definido como R7. Nas equações 8 e 9 são calculados os valores de tensão encontrados, conforme a variação de temperatura da bateria apresentada na Tabela 7.

$$V_{IO35Max} = V_{3,3VDC} * \frac{R_{temperaturaMax}}{R7 + R_{temperaturaMax}} = 3,3 * \frac{4,086}{10 + 4,086} = \frac{13,4838}{14,086} = 0,957V \quad (8)$$

$$V_{IO35Min} = V_{3,3VDC} * \frac{R_{temperaturaMin}}{R7 + R_{temperaturaMin}} = 3,3 * \frac{28,16}{10 + 28,16} = \frac{92,928}{38,16} = 2,435V \quad (9)$$

Os valores de tensão das equações 8 e 9 estão dentro da faixa linear de leitura dos conversores ADC, discutida anteriormente.

4.3 PLACA DE MONITORAMENTO DE BATERIAS

Para o desenvolvimento da PCB foi projetado o diagrama elétrico, com todos os componentes e seus terminais. O esquema elétrico consiste de terminais, circuitos de proteção, regulador de tensão,

divisores de tensão e sinalizadores visuais.

4.3.1 Diagrama elétrico

O diagrama desenvolvido é apresentado em 3 partes, sendo elas o circuito de alimentação e proteção, divisores de tensão e o microcontrolador.

No circuito de alimentação e proteção está projetado na entrada um terminal para conectar a bateria, seguido de um interruptor e um diodo de proteção, para agir contra uma possível inversão de polaridade. Foi utilizado um conversor de tensão DC-DC do tipo Step-Down, com circuito de saída idêntico ao apresentado no *datasheet* do componente. Na Figura 24 é exibido o circuito utilizado.

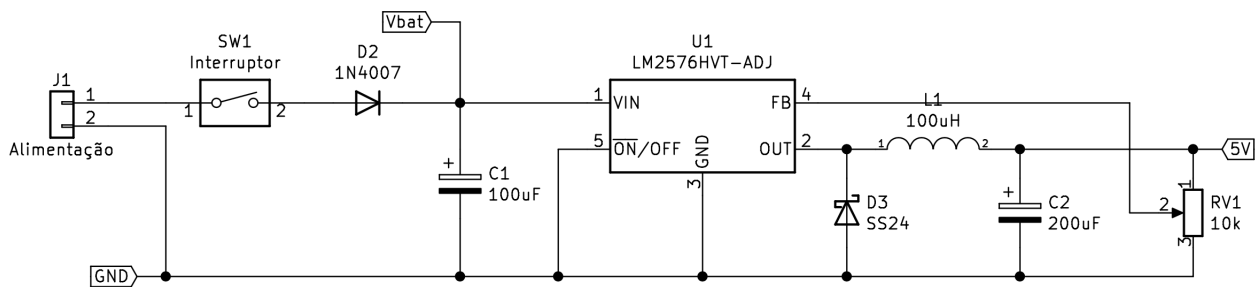


Figura 24 – Diagrama Elétrico. É utilizado diodo 1N4007, circuito integrado LM2576HV, bobina, capacitores, diodo zener e potenciômetro para ajuste da tensão de saída

Fonte: Autor.

Para a entrada dos ADCs foram projetados 4 divisores de tensão conforme calculados e apresentados na seção 4.2 na página 35. Na Figura 25 são apresentados os circuitos projetados.

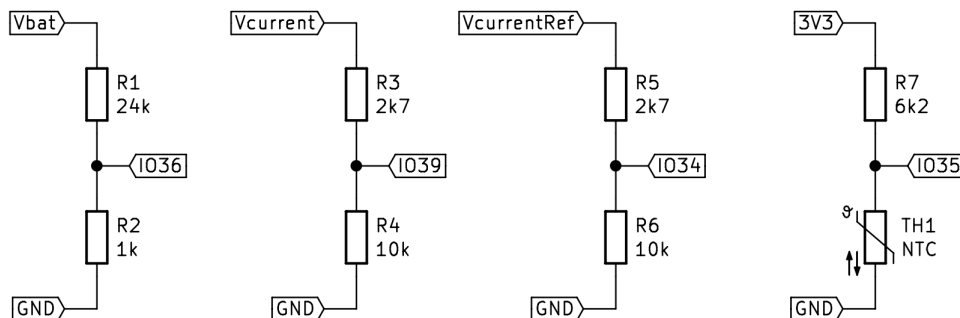


Figura 25 – Diagrama Elétrico. É utilizado resistores da série E24 e termistor NTC de 10k Ω

Fonte: Autor.

A Figura 26 apresenta a conexão dos pinos do microcontrolador, bem como o LED (Diodo Emissor de Luz - *Light-emitting Diode*), utilizado para sinalização, e conector do sensor de corrente.

4.3.2 Design PCB

O design foi feito utilizando componentes discretos, com exceção do circuito do conversor de tensão DC-DC, em que se utilizaram componentes SMD. As trilhas e conexões são apresentadas na Figura 27.

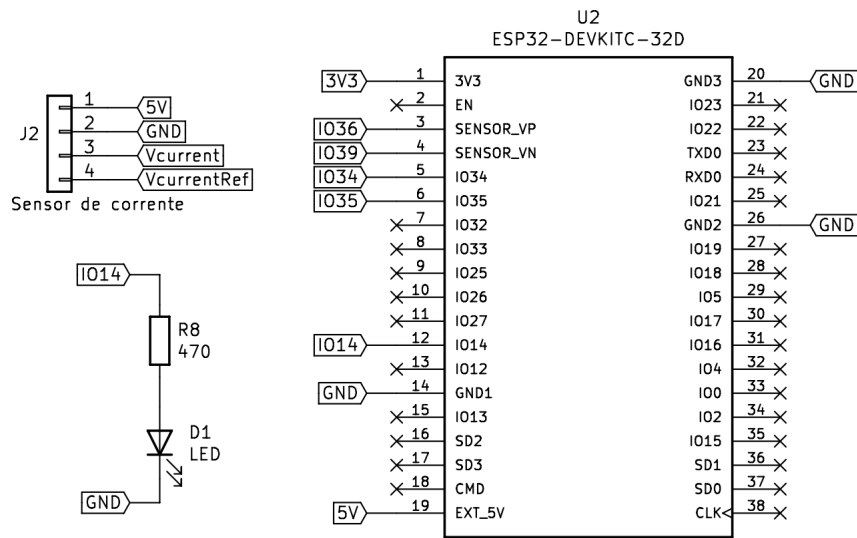


Figura 26 – Diagrama Elétrico. Microcontrolador ESP32

Fonte: Autor.

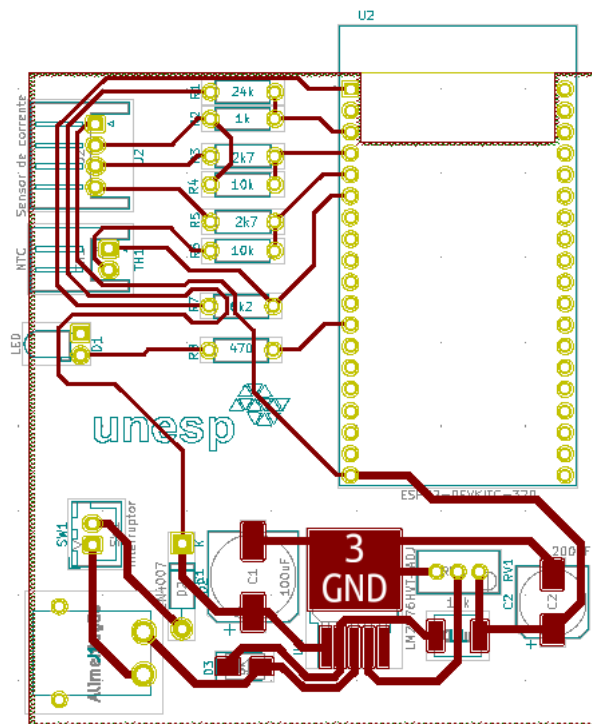


Figura 27 – Camada superior da PCB, sem plano terra para melhor visualização da disposição dos componentes e trilhas.

Fonte: Autor.

Para reduzir possíveis interferências no circuito, dado que o microcontrolador emite ondas de rádio na banda de 2.4GHz, foi inserido um plano de aterramento, tanto na camada superior quanto inferior da PCB. Foi realizado um recorte do plano logo abaixo da antena do microcontrolador, conforme recomendação da fabricante do ESP32. A Figura 28 apresenta a camada superior da placa.

Após gerar as conexões na placa, foi gerado um modelo 3D do PCB para visualização da placa, o qual encontra-se disponível na Figura 29.

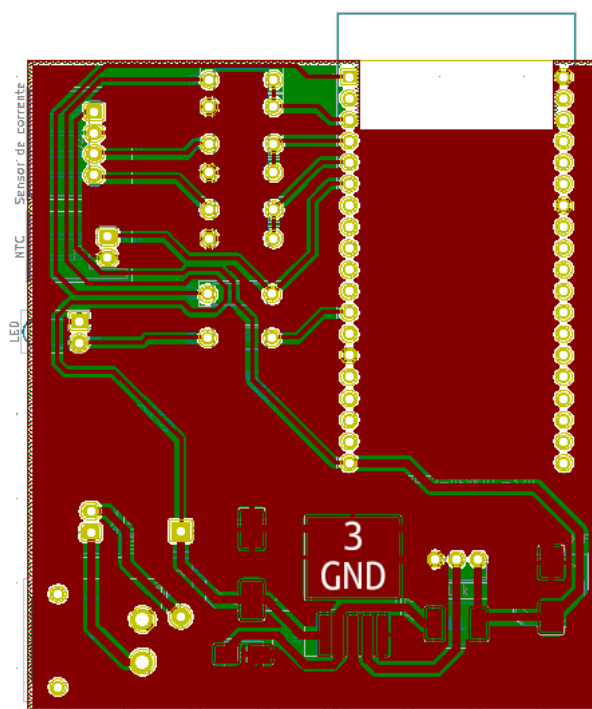


Figura 28 – Camada superior da PCB, com plano terra. A parte cobreada é representada pela cor vinho, o material FR-4 é representado pela cor verde, furos metalizados são representado por um círculo amarelo e os textos e marcações são representados pela cor azul.

Fonte: Autor.

4.4 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

Foi desenvolvido um procedimento para calibração do equipamento, para garantir alto nível de precisão e confiabilidade. São realizados dois passos para calibrar e configurar o equipamento, os quais encontram-se descritos abaixo.

4.4.1 Ajuste da tensão de saída do conversor DC-DC

A saída do conversor deve estar em 5,0V, para isso é necessário ajustar o potenciômetro afim de obter esta tensão. Este procedimento exige que se tenha uma fonte de alimentação de ao menos 9V. Além disso, é necessário ressaltar que este procedimento deve ser realizado antes de inserir o microcontrolador e o sensor na PCB, pois não é possível saber a tensão na saída do regulador antes desta etapa de ajuste.

4.4.2 Calibração das leituras do microcontrolador

Os resistores utilizados apresentam uma faixa de variação na resistência real de $\pm 10\%$ da resistência nominal, sendo necessária a calibração das respostas obtidas no ADC. O procedimento para calibração é realizado com o auxílio de uma página de calibração, desenvolvida para calcular os parâmetros de calibração, apresentada no Anexo A, seguindo os seguintes passos:

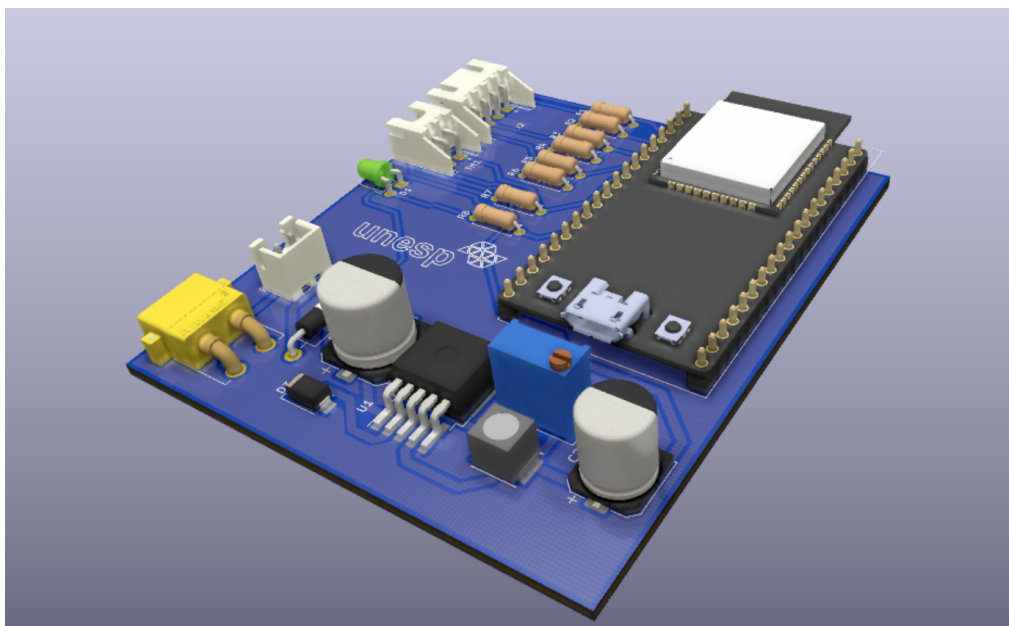


Figura 29 – PCB em 3D.

Fonte: Autor.

- Inserir uma fonte com 9,0V na entrada da bateria, inserir o valor obtido em V no campo "Valor (V) - Tensão 9V";
- Inserir uma fonte com 58,8V na entrada da bateria, inserir o valor obtido em V no campo "Valor (V) - Tensão 58,8V";
- A fonte pode estar em qualquer tensão dentro da faixa de leitura, deve ser inserido o sensor de corrente em um cabo em que não há passagem de corrente, inserir o valor obtido em I no campo "Valor (I) - Corrente nula", da mesma forma deve inserir o valor obtido em IRef no campo "Valor (IRef) - Corrente nula";
- Posicionar o sensor de corrente no cabo da polaridade positiva da bateria, com a indicação do sensor na direção da bateria. Colocar um carregador na bateria, quando a corrente estiver estabilizada deve ser inserido o valor obtido em I no campo "Valor (I) - Corrente de carga";
- Utilizando o mesmo carregador, com corrente constante, deve-se posicionar o sensor de corrente com a indicação contra a direção da bateria, de forma que a leitura seja realizada de forma contrária. Inserir o valor obtido em I no campo "Valor (I) - Corrente de descarga";
- Utilizar um alicate amperímetro para ter a corrente real que está circulando pela bateria e inserir o valor obtido em "Valor (I) - Corrente no Amperímetro";
- Após esta etapa basta pressionar o botão "Gerar Código" que será copiado e apresentado na tela o trecho de código que deverá ser inserido no código do *firmware*.

As Equações 10, 11, 12, 13 apresentam os cálculos para encontrar os parâmetros de calibração.

$$d = i - i_{ref} \quad (10)$$

$$FatorV = \left(\frac{900}{V_{min}} + \frac{5880}{V_{max}} \right) * 0,5 \quad (11)$$

$$FatorA_{discharge} = \frac{i_{discharge} - i_{ref} - d}{i_{medido}} \quad (12)$$

$$FatorA_{charge} = \frac{i_{charge} - i_{ref} - d}{i_{medido}} \quad (13)$$

4.5 SOFTWARES

4.5.1 API

A API consiste no conjunto de rotinas e padrões estabelecidos para utilização das funções no servidor, nas quais estas funções são divididas em: autenticação, inserção e consulta.

A autenticação do microcontrolador é realizada através de uma chave única que não expira, conhecida como *apiKey*. Esta chave é enviada nos cabeçalhos das requisições, nas quais são verificadas para executar a função.

No supervisorio, a autenticação é realizada com credenciais que expiram, popularmente conhecida como *token* de acesso. Os *tokens* são enviados nos cabeçalhos das requisições. São expirados após *n* segundos, negando a execução da função requisitada, tornando necessário realizar o *login* para ser obtido um novo *token*. Na Figura 30 é apresentado a requisição de autenticação. No banco de dados são armazenados os *hashs* criptográficos (SHA-256) das chaves e *tokens* de acesso. *Hash* é um algoritmo que mapeia dados de comprimento variável para dados de comprimento fixo, esta operação é irreversível, ou seja, não é possível descriptografar um *hash* (GILBERT; HANDSCHUH, 2003). O *hash* de um conteúdo sempre será o mesmo, ou seja, para validar a senha ou chave de acesso é realizado o *hash* criptográfico dos dados enviados, e então comparado ao *hash* que está salvo.

```
POST urlBase/auth HTTP/1.1
Content-Type: application/json

{
  "name": "José Victor Dobies",
  "password": "sistemaMonitoramento"
}
```

Figura 30 – Estrutura da requisição de autenticação.

Fonte: Autor.

A inserção de dados é realizada apenas pelo microcontrolador, enviando as informações da bateria monitorada. Os dados são enviados no formato JSON no corpo da requisição conforme apresentado na Figura 31. A estrutura da tabela do banco de dados é apresentada na Tabela 11. Os atributos "potInst" e "unix" não são enviados na requisição, a API é responsável por adicionar estes valores. *Unix* corresponde ao número de segundos desde a meia-noite de 01/01/1970.

A consulta de dados é realizada apenas pelo supervisorio, a API fornece dois tipos de consulta: atual e histórico. Ambas requisições são representadas na Figura 32. Para consulta atual o servidor

Tabela 11 – Estrutura da tabela "dadosBateria" no MySQL

Atributo	Tipo	Chave	Nulo	Extra
id	INT	Primária	Não	AUTO_INCREMENT
tensao	DOUBLE		Não	
corrente	DOUBLE		Não	
temperatura	INT		Não	
soc	INT		Não	UNSIGNED
potInst	DOUBLE		Não	
energia	DOUBLE		Não	
unix	INT		Não	UNSIGNED

Fonte: Autor.

```

POST urlBase/data HTTP/1.1
Authorization: Bearer apiKey
Content-Type: application/json

{
  "tensao": 25.2,
  "corrente": 32.4,
  "temperatura": 28,
  "soc": 45,
  "energia": 2.4
}

```

Figura 31 – Estrutura da requisição de inserção de dados.

Fonte: Autor.

retorna as informações de tensão, corrente, temperatura e SoC da bateria. Para consulta de histórico o servidor retorna todas informações contidas na tabela, no intervalo de tempo requisitado.

```

GET urlBase/data HTTP/1.1
Authorization: Bearer JWT

GET urlBase/data/:start/:finish HTTP/1.1
Authorization: Bearer JWT

```

Figura 32 – Estrutura da requisição de consulta de dados.

Fonte: Autor.

4.5.2 Firmware

Desenvolvido em C++, no qual o código se encontra no Anexo B. São utilizados os dois núcleos do ESP32 para executar funções ao mesmo tempo.

O primeiro núcleo realiza constantemente a aquisição dos dados dos sensores, incrementando em um acumulador. A aquisição é realizada a cada 10 ms. Em intervalos de 10 segundos são realizadas as médias dos acumuladores, os resultados são calculados e armazenados em variáveis globais. Para estimar o SoC foi utilizado a Contagem de Coulomb, conforme apresentado na Seção 2.1.2 na página 18.

O segundo núcleo é responsável por enviar as informações da bateria para o servidor. Este envio é realizado a cada 2 minutos.

Para calcular os valores obtidos através das leituras dos sensores foi realizada uma regressão linear, que descreve a tensão em função do sinal digital, na Figura 33 é apresentado o gráfico da região linear discutida anteriormente e a Equação 14 descreve a conversão de sinal digital para tensão em mV.

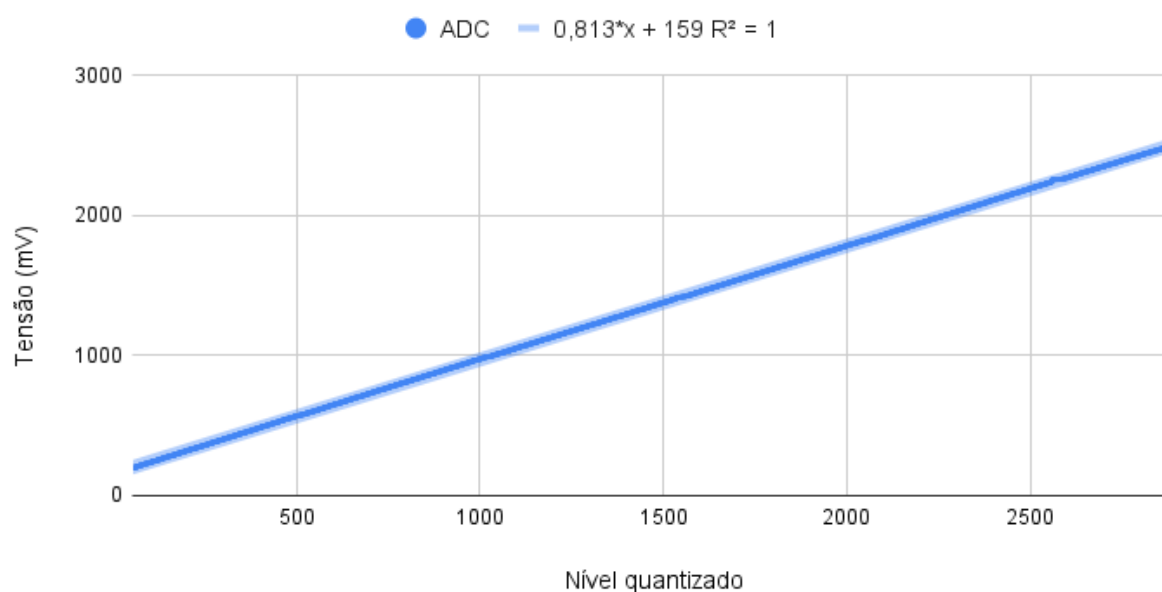


Figura 33 – Equação de conversão digital para tensão.

Fonte: Autor.

$$V = 0,813 * saída_{ADC} + 159 \quad (14)$$

Após encontrar a tensão convertida é realizado a multiplicação pelo fator de correção do sensor, obtido durante a calibração, resultando no valor da tensão ou corrente.

4.5.3 Supervisório

Ao entrar no sistema o usuário é direcionado para realizar *login*, apresentado na Figura 34. Após ser autenticado, será redirecionado para a página contendo as informações da bateria. A Figura 39 apresenta a tela de monitoramento, na qual não contém resultados do monitoramento, apenas dados aleatórios para a construção do supervisório. A caixa no canto superior esquerdo é utilizada para selecionar o horário final do histórico, sendo utilizado o botão ao lado para selecionar o intervalo (1 hora, 3 horas e etc.). Nos quatro cartões acima do gráfico são exibidos os dados atuais da bateria, no gráfico é exibido o histórico de informações da bateria, no qual é possível escolher os dados que serão visualizados. O histórico pode ser baixado em formato CSV, pressionando o botão "Baixar CSV". O gráfico também pode ser baixado, pressionando o ícone com três pontos no canto superior direito do gráfico.



Figura 34 – Tela de *login*.
Fonte: Autor.

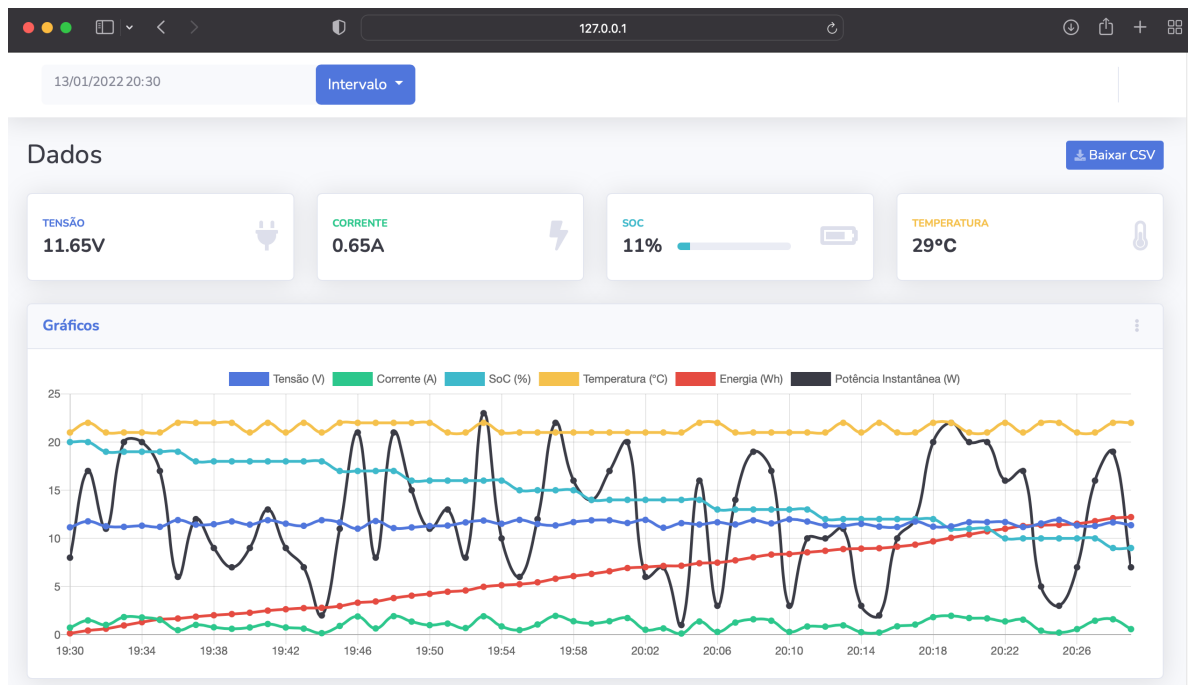


Figura 35 – Tela de monitoramento.
Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O monitoramento da bateria foi realizado através de outra PCB, na qual apresenta os mesmos recursos e conexões. A PCB utilizada foi desenvolvida anteriormente junto à Energy Source, em que foram substituídos os resistores dos circuitos que foram projetados na Seção 4.2, localizada na página 35. A prototipação da PCB desenvolvida no trabalho não foi possível devido a questão de custo. Na Figura 36 é apresentada a PCB utilizada.

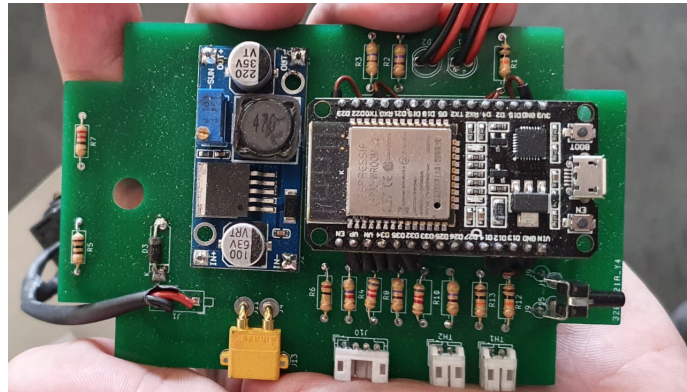


Figura 36 – Foto da PCB utilizada para realizar as medições.

Fonte: Autor.

Inicialmente foi realizado o procedimento de calibração, conforme apresentado na Figura 37. A calibração foi realizada seguindo os passos apresentados na subseção 4.4.2, localizado na página 39

Valor (V) - Tensão 9V:	Valor (I) - Corrente de carga:	<p style="text-align: center;">Código:</p> <pre>float voltageFactor = 1.8151127479485687; float ampFactorCharge = 3.634259259259259; float ampFactorDischarge = 2.7314814814814814; int ampDiffDefault = -2;</pre>
<input type="text" value="804"/>	<input type="text" value="1823"/>	
Valor (V) - Tensão 58,8V:	Valor (I) - Corrente de descarga:	
<input type="text" value="3310"/>	<input type="text" value="2098"/>	
Valor (I) - Corrente nula:	Valor (I) - Corrente no Amperímetro:	
<input type="text" value="1980"/>	<input type="text" value="43.2"/>	
Valor (IRef) - Corrente nula:	<input type="button" value="Gerar Código"/>	
<input type="text" value="1982"/>		

Figura 37 – Calibração do dispositivo

Fonte: Autor.

A predição do SoC utilizando a Contagem de Coulomb, necessita da capacidade total e restante da bateria que será monitorada. Foi utilizado um equipamento desenvolvido pela empresa Energy Source para medir essas capacidades. Os valores da capacidade total e restante são inseridos no código do *firmware*, e consecutivamente carregado no microcontrolador.

Após os procedimentos de calibração e atualização do *firmware*, o dispositivo de monitoramento foi conectado na bateria, cuja as especificações são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Especificações da bateria monitorada

Item	Valor
Tensão nominal (V)	44,4
Tensão máxima (V)	50,4
Tensão mínima (V)	36
Corrente máxima (A)	±150
Capacidade (Ah)	360

Fonte: Autor.

A instalação do dispositivo junto à bateria é apresentado na Figura 38, na qual o dispositivo está localizado na região circulada (indicada por "1"), o sensor de corrente está localizado na outra região circulada (indicada por "2") e a bateria indicada por "3".

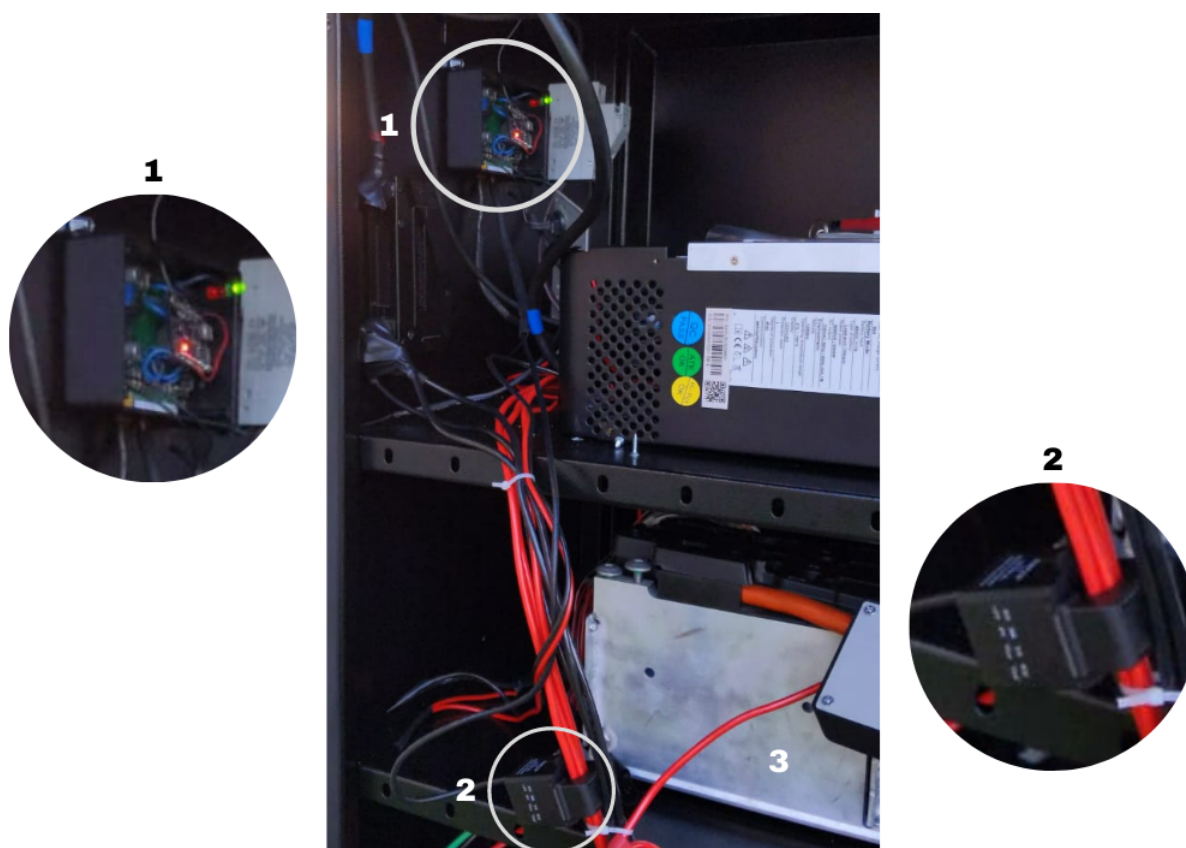


Figura 38 – Foto do dispositivo monitorando uma bateria de 44,4V 360Ah.

Fonte: Autor.

A bateria foi conectada a um inversor de tensão fotovoltaico *off-grid*, equipamento não conectado à rede elétrica da concessionária, que utiliza a energia das placas fotovoltaicas e das baterias, para converter corrente contínua em corrente alternada. Na Figura 39 são apresentados os dados obtidos durante o teste. Foi selecionado no gráfico as informações de potência instantânea e de energia, com intuito de facilitar a visualização dos dados.

Potência com magnitude negativa é caracterizada como injeção de potência na bateria, já a magnitude positiva é caracterizada como saída de potência da bateria. A informação de energia é apresentada de forma acumulativa, iniciando em 0 no período selecionado, sendo visualizado o total de energia que "entrou" ou "saiu" da bateria.

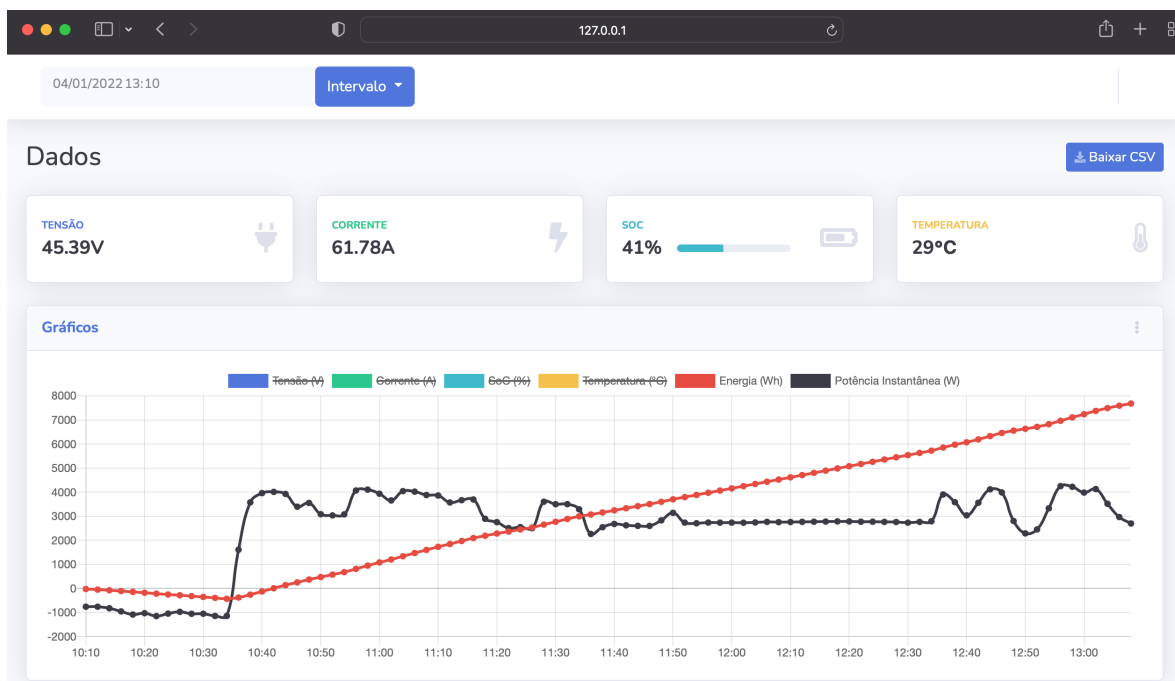
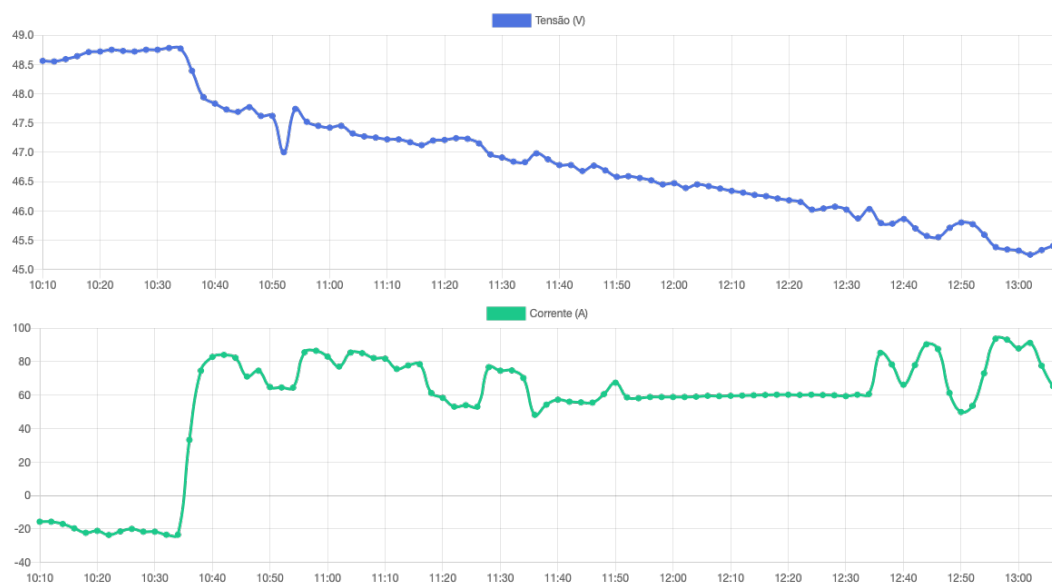


Figura 39 – Resultado do monitoramento no supervisório.

Fonte: Autor.

Analisando o gráfico obtido é possível chegar nos seguintes pontos: no início a bateria estava sendo carregada por uma fonte de aproximadamente 1000W, alimentada pelas placas fotovoltaicas. Em seguida foi acionada uma carga no inversor, alimentado pelas baterias e placas fotovoltaicas. Sabendo que a carga é contínua, necessitando aproximadamente de 5000W, pode se chegar ao seguinte ponto: o inversor utiliza as duas fontes de energia (fotovoltaica e bateria) para alimentar a carga, utilizando a energia fotovoltaica como fonte primária.

Os dados obtidos durante o monitoramento são apresentados no Anexo C no formato CSV. Os gráficos das informações monitoradas são apresentados na Figura 40, nos quais foram gerados pelo supervisório.



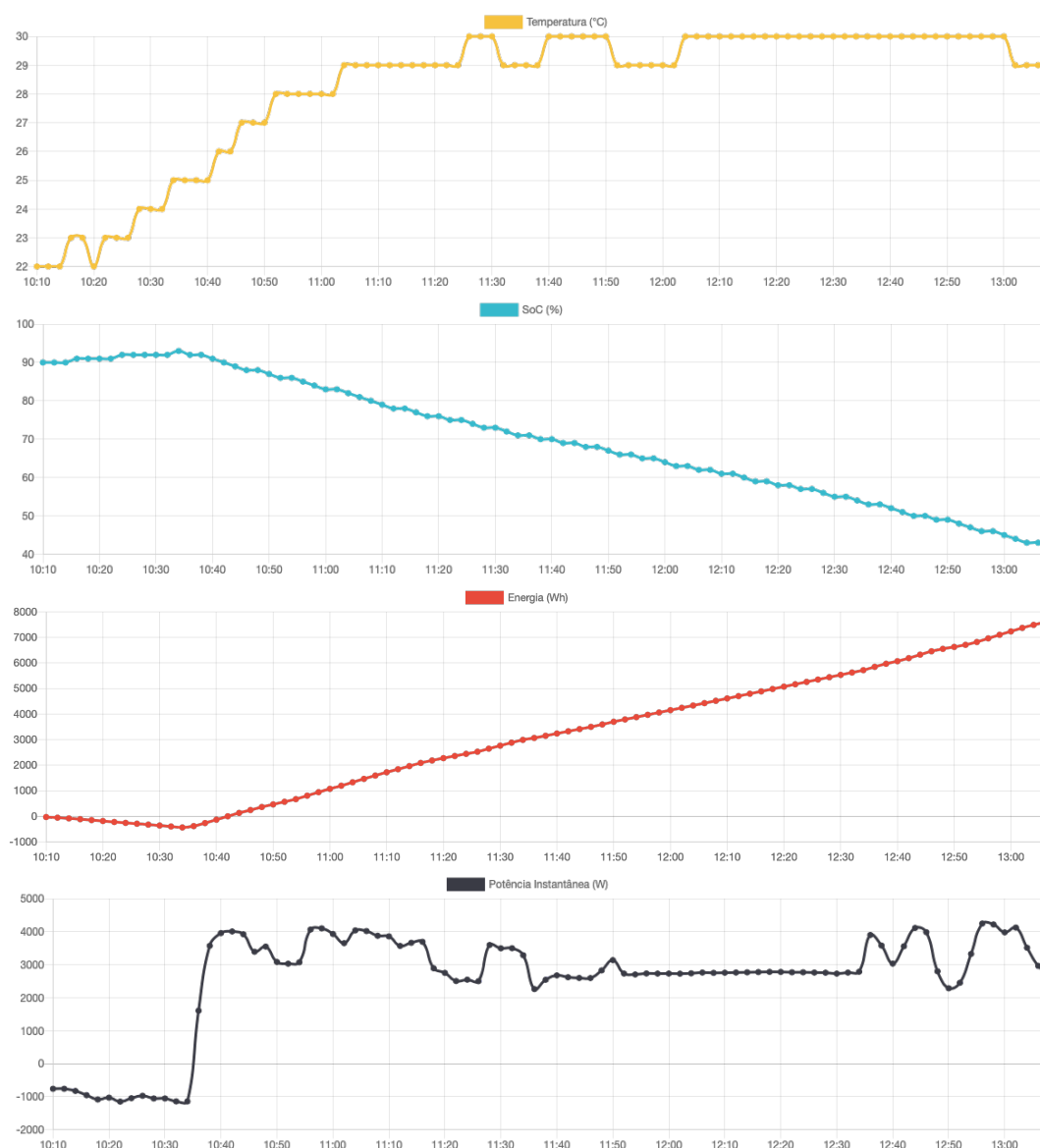


Figura 40 – Gráficos de tensão, corrente, temperatura, estado de carga, energia e potência instantânea, obtidos durante o teste.

Fonte: Autor.

O gráfico da tensão é possível observar a queda de tensão durante a descarga da bateria que varia de aproximadamente 48,7 a 45,5V.

A temperatura da bateria é possível analisar o aquecimento durante a carga e descarga, permanecendo no intervalo de temperatura correto para o funcionamento da bateria.

O estado de carga (SoC) no início estava com 90% e ao final do monitoramento ficou em 41%, o que resultou em 49% da capacidade total de energia entregue.

Não foi possível utilizar um equipamento para realizar a comparação entre os dados obtidos pelo dispositivo de monitoramento. Entretanto durante os testes foram medidos alguns dados com um alicate amperímetro (Fluke 374 True-rms). As Tabelas 13 e 14 apresentam as comparações de tensão e corrente entre os resultados obtidos.

Os erros médios encontrados nas medidas de tensão e corrente podem ser consideradas satisfatórias. Entretanto vale ressaltar que a Contagem de Coulomb é um método acumulativo, ou seja, os erros vão

Tabela 13 – Comparação dos resultados obtidos de tensão

Horário	Microcontrolador (V)	Amperímetro (V)	Erro (%)
10:14	48,59	48,3	0,6
10:42	47,73	47,5	0,48
12:30	46,02	45,7	0,7
13:02	45,25	45	0,55

Fonte: Autor.

Tabela 14 – Comparação dos resultados obtidos de corrente

Horário	Microcontrolador (A)	Amperímetro (A)	Erro (%)
10:14	-17,04	-17,2	0,93
10:42	84	84,3	0,35
12:30	59,33	59,5	0,28
13:02	91,18	91,4	0,24

Fonte: Autor.

se tornando mais relevantes a medida que o tempo de análise vai se estendendo. O erro acumulado afeta apenas na predição do estado de carga, não influenciando as demais informações obtidas pelo sistema de monitoramento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de monitoramento para baterias Íon-Lítio, no qual foi realizado o projeto da placa eletrônica para aquisição dos dados, servidor *web* e supervisor para visualização das informações da bateria. O trabalho foi realizado na prática, apesar do *hardware* projetado não ter sido prototipado, a placa utilizada para realizar o monitoramento foi compatível com as especificações propostas e com os *softwares* desenvolvidos para este trabalho.

O algoritmo da Contagem de Coulomb obteve resposta satisfatória durante os testes. O monitoramento da bateria pelo supervisor é realizado de forma simples e facilmente compreendida pelo usuário, permitindo a utilização dos dados e gráficos em ambientes fora da plataforma. O procedimento de calibração permitiu que as informações obtidas pelo dispositivo sejam satisfatórias.

Foi perceptível que, existe imprecisão nas medidas de tensão e corrente, afetando a predição de estado de carga da bateria com longos períodos de monitoramento. Esta imprecisão é devido à não linearidade da conversão do sinal analógico para digital.

Trabalhos futuros poderão utilizar outros métodos de predição de estado de carga em conjunto com a Contagem de Coulomb, auxiliando na correção do erro acumulado, um algoritmo bom para utilizar em conjunto é o Filtro Extendido de Kalman. As imprecisões das medidas poderão ser reduzida utilizando conversores analógico-digital com maior precisão e resolução.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. **Fundamentos de circuitos elétricos**. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- BEAKLEY, W. The design of thermistor thermometers with linear calibration. **Journal of Scientific Instruments**, IOP Publishing, v. 28, n. 6, p. 176, 1951.
- BERGVELD, H. J.; KRUIJT, W. S.; NOTTEN, P. H. Battery management systems. In: **Battery Management Systems**. [S.l.]: Springer, 2002. p. 9–30.
- BOYLESTAD, R. L. **Introductory circuit analysis**. [S.l.]: Pearson Education, 2013.
- BRAIN, M.; BRYANT, C. W.; PUMPHREY, C. How batteries work. **Battery Arrangement and Power—HowStuffWorks**, <http://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/battery6.htm/printable>, accessed Dec, v. 14, 2015.
- CHENG, F. et al. Functional materials for rechargeable batteries. **Advanced Materials**, Wiley Online Library, v. 23, n. 15, p. 1695–1715, 2011.
- CHIASSEON, J.; VAIRAMOHAN, B. Estimating the state of charge of a battery. In: IEEE. **Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003**. [S.l.], 2003. v. 4, p. 2863–2868.
- COUTTS, A. William Cruickshank of Woolwich. **Annals of Science**, Taylor & Francis, v. 15, n. 2, p. 121–133, 1959.
- CROMPTON, T. R.; CROMPTON, T. P.; CROMPTON, T. R. **Battery reference book**. [S.l.]: Newnes, 2000.
- DANIEL, C.; BESENHARD, J. O. **Handbook of battery materials**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- DAY, J. The (un) revised OSI reference model. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, ACM New York, NY, USA, v. 25, n. 5, p. 39–55, 1995.
- DAY, J. D.; ZIMMERMANN, H. The OSI reference model. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 71, n. 12, p. 1334–1340, 1983.
- EMBARCADOS. **Configurando o ambiente de desenvolvimento do ESP32 no Windows**. s.d. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/ambiente-esp32-no-windows>>.
- FOROUZAN, B. A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. [S.l.]: AMGH Editora, 2009.
- GARCHE, J.; JOSSEN, A. Battery management systems (BMS) for increasing battery life time. In: IEEE. **TELESCON 2000. Third International Telecommunications Energy Special Conference (IEEE Cat. No. 00EX424)**. [S.l.], 2000. p. 81–88.
- GILBERT, H.; HANDSCHUH, H. Security analysis of SHA-256 and sisters. In: SPRINGER. **International workshop on selected areas in cryptography**. [S.l.], 2003. p. 175–193.
- IBRAHIM, D. **Microcontroller based applied digital control**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.
- IRWIN, J. D.; NELMS, R. M. **Basic engineering circuit analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.
- JOW, T. R. et al. **Electrolytes for lithium and lithium-ion batteries**. [S.l.]: Springer, 2014. v. 58.

- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Redes de computadores e a internet*. São Paulo: Person, v. 28, 2006.
- KURZWEIL, P. Gaston planté and his invention of the lead–acid battery—the genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 195, n. 14, p. 4424–4434, 2010.
- LI, M. et al. 30 years of lithium-ion batteries. *Advanced Materials*, Wiley Online Library, v. 30, n. 33, p. 1800561, 2018.
- MALVINO, A. P.; BATES, D. J. *Eletrônica*. [S.l.]: AMGH, 2011.
- MAUGER, A.; JULIEN, C. Critical review on lithium-ion batteries: are they safe? sustainable? *Ionics*, Springer, v. 23, n. 8, p. 1933–1947, 2017.
- MCALLISTER, W. *Divisor de Tensão*. s.d. Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-resistor-circuits/a/ee-voltage-divider>>.
- MOZILLA. *Métodos de requisição HTTP*. s.d. Disponível em: <<https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/HTTP/Methods>>.
- NG, K. S. et al. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied energy*, Elsevier, v. 86, n. 9, p. 1506–1511, 2009.
- NIZAM, M. et al. Battery management system design (bms) for lithium ion batteries. In: AIP PUBLISHING LLC. *AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2020. v. 2217, n. 1, p. 030157.
- PANG, S. et al. Battery state-of-charge estimation. In: IEEE. *Proceedings of the 2001 American control conference.(Cat. No. 01CH37148)*. [S.l.], 2001. v. 2, p. 1644–1649.
- PISTOIA, G. *Lithium-ion batteries*. [S.l.]: Elsevier, 2013.
- PLETT, G. L. *Battery management systems, Volume I: Battery modeling*. [S.l.]: Artech House, 2015.
- QI, J.; LU, D. D.-C. Review of battery cell balancing techniques. In: IEEE. *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. [S.l.], 2014. p. 1–6.
- RICHTEK. *Designing Applications with Lithium-Ion Batteries*. s.d.
- SAXENA, S. et al. Accelerated degradation model for c-rate loading of lithium-ion batteries. *International journal of electrical power & energy systems*, Elsevier, v. 107, p. 438–445, 2019.
- SCHALKWIJK, W. van; SCROSATI, B. *Advances in lithium-ion batteries*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.
- TANENBAUM, A. S. *Redes de computadores*. [S.l.]: Pearson educação, 2003.
- WINTER, M.; BRODD, R. J. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical reviews*, ACS Publications, v. 104, n. 10, p. 4245–4270, 2004.
- XIAO, C. et al. An overview of integratable current sensor technologies. In: IEEE. *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003*. [S.l.], 2003. v. 2, p. 1251–1258.
- ZAGHIB, K. et al. Lifepo4 safe li-ion polymer batteries for clean environment. *Journal of power sources*, Elsevier, v. 146, n. 1-2, p. 380–385, 2005.

ANEXO A – PÁGINA DE CALIBRAÇÃO

```

<!DOCTYPE html>
<html lang='pt-br'><head>
<meta charset='UTF-8'>
</head>
<body>
<h5>Valor (V) - Tensão 9V:</h5>
<input type='number' id='minVoltage'>
<h5>Valor (V) - Tensão 58,8V:</h5>
<input type='number' id='maxVoltage'>
<h5>Valor (I) - Corrente nula:</h5>
<input type='number' id='valueI'>
<h5>Valor (IRef) - Corrente nula:</h5>
<input type='number' id='valueIRef'>
<h5>Valor (I) - Corrente de carga:</h5>
<input type='number' id='valueICharge'>
<h5>Valor (I) - Corrente de descarga:</h5>
<input type='number' id='valueIDischarge'>
<h5>Valor (I) - Corrente no Amperimetro:</h5>
<input type='number' id='valueIMeasure'>
<input type='button' onclick='calc()' value='Gerar Código'>
<div style='display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-top: 15px;' id='code'>
</div>
<script src='calibrate.js'></script>
<script src='https://code.jquery.com/jquery-3.6.0.min.js'
integrity='sha256-/xUj+3OJU5yExlq6GSYGSHk7tPXikynS7ogEvDej/m4='
crossorigin='anonymous'></script>
<script>
function calc() {
const vMin = $('#minVoltage').val();
const vMax = $('#maxVoltage').val();
const i = $('#valueI').val();
const iRef = $('#valueIRef').val();
const iCharge = $('#valueICharge').val();
const iDischarge = $('#valueIDischarge').val();
const iMeasure = $('#valueIMeasure').val();

if ((!vMin) || (!vMax) || (!i) || (!iRef) || (!iCharge) || (!iDischarge) || (!iMeasure)) return alert('Preencha todos os campos!');

let diffDefault = (i - iRef);
let voltageFactorMin = 900 / vMin;
let voltageFactorMax = 5880 / vMax;
let voltageFactor = (voltageFactorMax + voltageFactorMin) / 2;
let ampsFactorCharge = Math.abs((iCharge - iRef - diffDefault)/iMeasure);
let ampsFactorDischarge = Math.abs((iDischarge - iRef - diffDefault)/iMeasure);

```

```
let code = `float voltageFactor = $voltageFactor;
float ampFactorCharge = $ampsFactorCharge;
float ampFactorDischarge = $ampsFactorDischarge;
int ampDiffDefault = $diffDefault;`
$('code').html(code);
textToClipboard(code);
alert('Codigo copiado!');
}
```

```
function textToClipboard(text) {
var dummy = document.createElement('textarea');
document.body.appendChild(dummy);
dummy.value = text;
dummy.select();
document.execCommand('copy');
document.body.removeChild(dummy);
}
</script>
</body></html>
```


ANEXO B – FIRMWARE

```

#include <WiFi.h>
#include 'HTTPClient.h'

const char* ssid = ""; //Nome da rede
const char* password = ""; //Senha da rede

const char* host = '192.168.0.120'; //IP ou domínio do servidor
int port = 3000; //Porta utilizada
String path = '/data'; //Caminho para enviar os dados

float batMax = 12; //Tensão máxima da bateria
float batMin = 9; //Tensão mínima da bateria
float capacity = 2500; //Capacidade da bateria em mAh
float socStartup = 50.0; //Estado de carga atual da bateria
float currentCapacity = capacity * (socStartup / 100);

// Inserir valores da calibração
float voltageFactor = 2.3; //Correção leitura de tensão
float ampFactorCharge = 3; //Correção leitura de corrente na carga
float ampFactorDischarge = 2.8; //Correção leitura de corrente na descarga
int ampDiffDefault = -3; //Diferença de leitura com corrente nula

define ledWiFi 14 //Pino saída de sinalização do WiFi

int PINV = 36; //Pino entrada de tensão da bateria
int PINIRef = 34; //Pino entrada da corrente de referência
int PINI = 39; //Pino entrada da corrente do sensor
int PINT = 35; //Pino entrada da temperatura

int sumV = 0;
int sumI = 0;
int sumIR = 0;
int sumT = 0;
int counterAvg = 0;
float v = 0.0;
float i = 0.0;
float energy = 0.0;

```

```
int temperature = 0;
int soc = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(ledWiFi, OUTPUT);
  ledW(false);

  delay(500);

  xTaskCreatePinnedToCore(sampleRead, 'coreTaskRead', 10000, NULL, 1, NULL, 1);
  delay(500);

  xTaskCreatePinnedToCore(dataSend, 'coreTaskSendData', 10000, NULL, 1, NULL, 0);
  delay(500);
}

void sampleRead(void * pvParamatros) {
  unsigned long startTime = millis();
  while (true) {
    int sensorValue;
    sensorValue = analogRead(PINV);
    sumV += sensorValue;
    sensorValue = analogRead(PINI);
    sumI += sensorValue;
    sensorValue = analogRead(PINIRef);
    sumIR += sensorValue;
    sensorValue = analogRead(PINT);
    sumT += sensorValue;

    counterAvg++;

    if (counterAvg == 1000) {
      unsigned long finishTime = millis();

      int sV = (sumV / counterAvg);
      int sI = (sumI / counterAvg);
      int sIR = (sumIR / counterAvg);
      int sT = (sumT / counterAvg);
```

```
v = (calcVoltage(sV) * voltageFactor) / 100.00;

int voltageI = calcVoltage(sI);
int voltageIR = calcVoltage(sIR);
int diffI = voltageI - voltageIR - ampDiffDefault;

if (diffI != 0){
i = calcAmps(diffI);
} else {
i = 0;
}

float timePot = (finishTime - startTime) / 3600000.0000;

energy = v * i * timePot;
soc = calcPercentage(i, timePot);
temperature = calcTemperature(sT);

counterAvg = 0;
sumV = 0;
sumI = 0;
sumIR = 0;
sumT = 0;

startTime = millis();
}
delay(10);
}
}

void dataSend( void * pvParametros ) {
while (true) {
for (int z = 0; z < 120; z++) {
checkConnection();
delay(1000);
}
sendData();
}
}
```

```
int calcVoltage(int level) {
return round(0.813 * level + 159);
}
```

```
int calcPercentage(float i, float timePot) {
return round(currentCapacity - i * timePot);
}
```

```
float calcAmps(int diff) {
float amps = 0.0;
if (diff > 0){
amps = diff / ampFactorDischarge;
} else {
amps = diff / ampFactorCharge;
}
return amps;
}
```

```
float calcTemperature(float reading) {
float rinf = 0;
float tempreturn = 0;
float R = 0;
float rref = 10000;
int B = 3977;
float t0 = 25 + 273.15;
R = (4095 * rref / reading) - rref;
rinf = rref * exp(-B / t0);
tempreturn = B / (log(R / rinf)) - 273.15;

return (tempreturn + 5);
}
```

```
bool sendData() {
HTTPClient httpNewData;
String link = 'https://' + String(host) + ':' + String(port) + String(path);
httpNewData.begin(link);
httpNewData.addHeader('Content-Type', 'application/json');
String reqBody = '{\'v\': ' + String(v) + ', \'i\': ' + String(i) + ', \'t\': ' + String(temperature) + ', \'soc\': ' + String(soc) + ', \'energy\': ' +
String(energy) + '}';
int resCode = httpNewData.POST(reqBody);
}
```

```
httpNewData.end();
if ((resCode >= 200) (resCode < 300)) {
return true;
} else {
Serial.println('Falhou! Código: ' + String(resCode));
return false;
}
}
```

```
void checkConnection() {
if (WiFi.status() == WLCONNECTED) {
ledW(HIGH);
} else {
ledW(LOW);
startWiFi();
}
}
```

```
void startWiFi() {
WiFi.begin(ssid, password);
int count = 0;
while (WiFi.status() != WLCONNECTED) {
ledW(HIGH);
delay(250);
ledW(LOW);
delay(250);
Serial.print('.');
count++;
if (count > 30) {
ESP.restart();
}
}
ledW(HIGH);
}
```

```
void ledW(bool state) {
digitalWrite(ledWiFi, state);
}
void loop() {}
```

ANEXO C – DADOS OBTIDOS PELO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Tensão (V), Corrente (A), Temperatura (°C), SoC (%), Energia (Wh), Potência Instantânea (W), unixtimestamp (s)

48.56,-15.7,22,90,-12.71,-762,1641301803
48.55,-15.7,22,90,-12.71,-762,1641301923
48.59,-17.04,22,90,-13.79,-828,1641302043
48.64,-19.68,23,91,-15.95,-957,1641302163
48.71,-22.32,23,91,-18.12,-1087,1641302283
48.72,-21.16,22,91,-17.18,-1031,1641302403
48.75,-23.64,23,91,-19.21,-1152,1641302523
48.73,-21.5,23,92,-17.45,-1048,1641302643
48.72,-20.01,23,92,-16.24,-975,1641302763
48.75,-21.66,24,92,-17.6,-1056,1641302883
48.75,-21.66,24,92,-17.59,-1056,1641303003
48.78,-23.48,24,92,-19.09,-1145,1641303123
48.77,-23.48,25,93,-19.09,-1145,1641303243
48.39,33.18,25,92,26.51,1606,1641303363
47.94,74.55,25,92,59.58,3574,1641303483
47.83,82.78,25,91,65.98,3959,1641303603
47.73,84,26,90,66.82,4009,1641303723
47.69,82.25,26,89,65.36,3923,1641303843
47.77,71.05,27,88,56.55,3394,1641303963
47.62,74.55,27,88,59.19,3550,1641304083
47.62,64.75,27,87,51.42,3083,1641304203
47.64,5,28,86,51.31,3032,1641304323
47.74,64.4,28,86,51.23,3074,1641304443
47.52,85.57,28,85,67.76,4066,1641304563
47.45,86.45,28,84,68.37,4102,1641304683
47.42,82.95,28,83,65.56,3933,1641304803
47.45,77,28,83,60.88,3654,1641304923
47.32,85.4,29,82,67.35,4041,1641305043
47.27,85.05,29,81,67,4020,1641305163
47.25,82.08,29,80,64.63,3878,1641305283
47.22,81.72,29,79,64.31,3859,1641305403
47.22,75.6,29,78,59.48,3570,1641305523
47.17,77.7,29,78,61.09,3665,1641305643
47.12,78.4,29,77,61.56,3694,1641305763
47.2,61.25,29,76,48.19,2891,1641305883
47.21,58.27,29,76,45.84,2751,1641306003
47.24,53.02,29,75,41.75,2505,1641306123
47.23,53.9,29,75,42.43,2546,1641306243
47.15,53.02,30,74,41.67,2500,1641306363
46.96,76.65,30,73,59.98,3599,1641306483
46.91,74.55,30,73,58.27,3497,1641306603
46.84,74.72,29,72,58.34,3500,1641306723
46.83,70.17,29,71,54.77,3286,1641306843
46.98,48.13,29,71,37.68,2261,1641306963

46.88,54.25,29,70,42.38,2543,1641307083
46.78,57.23,30,70,44.61,2677,1641307203
46.78,56,30,69,43.66,2620,1641307323
46.68,55.65,30,69,43.29,2598,1641307443
46.77,55.48,30,68,43.23,2595,1641307563
46.69,60.55,30,68,47.12,2827,1641307683
46.58,67.38,30,67,52.3,3139,1641307803
46.59,58.63,29,66,45.53,2732,1641307923
46.56,58.1,29,66,45.09,2705,1641308043
46.52,58.8,29,65,45.59,2735,1641308163
46.45,58.8,29,65,45.53,2731,1641308283
46.47,58.8,29,64,45.53,2732,1641308403
46.39,58.8,29,63,45.53,2728,1641308523
46.45,58.97,30,63,45.65,2739,1641308643
46.42,59.5,30,62,46.03,2762,1641308763
46.38,59.33,30,62,45.85,2752,1641308883
46.34,59.5,30,61,45.95,2757,1641309003
46.31,59.67,30,61,46.05,2763,1641309123
46.27,59.85,30,60,46.14,2769,1641309243
46.25,60.03,30,59,46.27,2776,1641309363
46.21,60.2,30,59,46.36,2782,1641309483
46.18,60.2,30,58,46.34,2780,1641309603
46.15,60.03,30,58,46.17,2770,1641309723
46.02,60.2,30,57,46.16,2770,1641309843
46.04,60,30,57,46.1,2762,1641309963
46.07,59.85,30,56,45.94,2757,1641310083
46.02,59.33,30,55,45.5,2730,1641310203
45.87,60.2,30,55,46.01,2761,1641310323
46.03,60.55,30,54,46.44,2787,1641310443
45.79,85.22,30,53,65.03,3902,1641310563
45.78,78.22,30,53,59.66,3581,1641310683
45.86,66.15,30,52,50.53,3034,1641310803
45.7,77.88,30,51,59.31,3559,1641310923
45.57,90.3,30,50,68.59,4115,1641311043
45.55,87.5,30,50,66.42,3986,1641311163
45.71,61.25,30,49,46.63,2800,1641311283
45.8,49.88,30,49,38.07,2285,1641311403
45.77,53.55,30,48,40.84,2451,1641311523
45.59,72.97,30,47,55.45,3327,1641311643
45.38,93.63,30,46,70.81,4249,1641311763
45.34,93.1,30,46,70.36,4221,1641311883
45.32,87.85,30,45,66.36,3981,1641312003
45.25,91.18,29,44,68.76,4126,1641312123
45.33,77.53,29,43,58.55,3514,1641312243
45.4,65.28,29,43,49.38,2964,1641312363
45.44,59.33,29,42,44.92,2696,1641312483