



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



Victor Paulo Ribeiro de Oliveira (EMC/UFG)

Dispositivo de Telemetria e Monitoramento de carga e condição de bateria para e-scooter

Goiânia
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Victor Paulo Ribeiro de Oliveira

Título do trabalho: **Dispositivo de Telemetria e Monitoramento de carga e condição de bateria para e-Scooter**

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Geyverson Teixeira De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Victor Paulo Ribeiro De Oliveira, Discente**, em 28/11/2025, às 23:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5820198** e o código CRC **38AC6D10**.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



Dispositivo de Telemetria e Monitoramento de carga e condição de bateria para e-scooter

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à disciplina PFC, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula

Goiânia
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

RIBEIRO DE OLIVEIRA, VICTOR PAULO

Dispositivo de Telemetria e Monitoramento de carga e condição de bateria para e-scooter [manuscrito] / VICTOR PAULO RIBEIRO DE OLIVEIRA. - 2025.

20 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos.

1. MICROMOBILIDADE ELÉTRICA. 2. telemetria. 3. monitoramento. 4. e-scooter. 5. ESP32. I. Paula, Geyverson Teixeira de, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) vinte e oito dia(s) do mês de novembro do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Dispositivo de Telemetria e Monitoramento de carga e condição de bateria para e-Scooter**”, de autoria de **Victor Paulo Ribeiro de Oliveira**, do curso de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Fernando Ferreira de Melo (EMC/UFG) e Prof. Dr. Igor Kopcak (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,0 (nove vírgula zero), tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Geyverson Teixeira De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 12:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Kopcak, Professor do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 12:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Ferreira De Melo, Professor do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 12:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5820178** e o código CRC **9E36A47F**.

Dispositivo de Telemetria e Monitoramento de carga e condição de bateria para e-scooter

Victor Paulo Ribeiro de Oliveira (EMC/UFG)

Resumo— A micromobilidade elétrica tem se destacado como alternativa sustentável nas áreas urbanas, oferecendo versatilidade no deslocamento. Entretanto, a degradação precoce das baterias de baixa capacidade compromete a vida útil e a confiabilidade dos veículos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo de telemetria baseado no microcontrolador ESP32, destinado ao monitoramento da carga e do estado de saúde de baterias de e-scooters. O sistema realiza medições de tensão e corrente por meio de sensores dedicados, transmitindo os dados em tempo real via Bluetooth para um dispositivo móvel. A solução proposta busca possibilitar o acompanhamento contínuo da condição da bateria, favorecendo a manutenção preventiva e prolongando sua vida útil. Dessa forma, o dispositivo contribui para o aumento da confiabilidade dos veículos de micromobilidade elétrica, além de se apresentar como uma alternativa de baixo custo, eficiente e alinhada às demandas atuais de mobilidade sustentável.

Palavras-chave— micromobilidade elétrica; telemetria; monitoramento; e-scooter; ESP32.

Abstract— Electric micromobility has emerged as a sustainable alternative in urban areas, offering versatility in transportation. However, the premature degradation of low-capacity batteries compromises vehicle lifespan and reliability. This work presents the development of a telemetry device based on the ESP32 microcontroller, designed to monitor the charge and health status of e-scooter batteries. The system measures voltage and current using dedicated sensors and transmits the data in real time via Bluetooth to a mobile device. The proposed solution enables continuous monitoring of battery conditions, supporting preventive maintenance and extending battery life. Therefore, the device enhances the reliability of electric micromobility vehicles while providing a low-cost, efficient solution aligned with current demands for sustainable mobility.

Keywords— electric micromobility; telemetry; monitoring; e-scooter; ESP32.

I. Introdução

A mobilidade urbana sustentável é apontada como uma solução para democratizar e humanizar as cidades, priorizando modos de transporte não motorizados e integrando diferentes alternativas de deslocamento. O avanço tecnológico tem desempenhado papel relevante nesse processo, ao mesmo tempo em que os efeitos negativos de uma mobilidade fragilizada se tornam evidentes, como congestionamentos, degradação do espaço urbano e impactos à saúde pública [1]. Nesse cenário, surgem propostas de mobilidade inteligente e compartilhada, ainda em estágio incipiente nos planos nacionais.

Entre as alternativas recentes, destacam-se os veículos de micromobilidade, especialmente as scooters elétricas (e-scooters), cujo uso tem crescido rapidamente. De acordo com [2], esse segmento oferece às empresas e aos usuários

a possibilidade de enfrentar o trânsito urbano de forma mais eficiente, reduzindo a dependência do automóvel e contribuindo para benefícios ambientais e sociais. Contudo, a expansão dessas soluções frequentemente ocorreu sem o devido planejamento, resultando em desafios de infraestrutura, suporte e confiabilidade [3],[4].

À vista disso, é importante que as baterias de potência satisfaçam o requerimento em desempenho e eficiência pelos veículos de novas energias. Diante disso, as baterias de íons de lítio são amplamente utilizadas por sua alta densidade energética, baixo peso e longa vida útil [5], [6], tornando-se componentes críticos em aplicações de mobilidade, como as e-scooters. Contudo, seu desempenho e vida útil são fortemente afetados por condições de operação, como temperatura, profundidade de descarga e SOC (*State of Charge*) [4]. Temperaturas fora da faixa ideal de 20-30 °C, por exemplo, podem reduzir drasticamente a energia disponível e acelerar a degradação. Além disso, permitir que o SOC caia frequentemente abaixo de níveis críticos (10-20%) pode danificar a bateria permanentemente. A falha em monitorar esses parâmetros pode não apenas comprometer a autonomia do veículo, mas também levar a riscos de segurança, como o superaquecimento e a fuga térmica [4], [7]. Um fenômeno crítico onde o aumento de temperatura acelera reações químicas exotérmicas em cadeia, gerando calor incontrolável que pode resultar na combustão da bateria.

Como solução para esse problema, tem-se os BMS (*Battery Management System*), que são projetados para monitorar e proteger a bateria, mas muitas vezes os sistemas convencionais são superdimensionados, elevando custo e peso, ou falham em detectar sinais precoces de degradação [8]. A falta de um monitoramento preciso e acessível leva a trocas prematuras de baterias, aumentando os custos operacionais e o impacto ambiental relacionado ao descarte. Estima-se que o SOH (*State of Health*), um indicador da capacidade da bateria em relação ao seu estado de nova, seja o principal parâmetro para determinar o fim da vida útil (*End of Life - EOL*), sendo o limite de 80% comumente adotado em EVs (*Electric Vehicles*) para evitar instabilidades [5].

Diante desse cenário, o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo de telemetria e monitoramento de baixo custo para a carga (SOC) e condição (SOH) da bateria de e-scooters. O sistema, baseado em medições contínuas de tensão e corrente, utiliza algoritmos embarcados para estimar a condição da bateria [6]. Isso permite uma operação mais eficiente, a identificação de anomalias para manutenção preditiva [8] e, conseqüentemente, contribui para o aumento da confiabilidade e sustentabilidade na mobilidade elétrica urbana.

Para atingir este objetivo, foram definidas as seguintes etapas de desenvolvimento:

- Realizar a simulação virtual do sistema de bateria e sensores para validar a lógica dos algoritmos de estimação;
- Desenvolver o circuito de sensoriamento de tensão (divisor de tensão) e de corrente (sensor de Efeito Hall ACS712);
- Desenvolver os circuitos de leitura e adequação de sinal (filtragem de ruído e adaptação de nível) necessários para a interface com o microcontrolador;
- Implementar a lógica de calibração e os algoritmos de estimação em um microcontrolador ESP32;
- Desenvolver o circuito de transmissão de dados via Bluetooth;
- Desenvolver um aplicativo móvel (utilizando a plataforma *MIT App Inventor*) para o recebimento e visualização dos dados de telemetria.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: A Seção II (Base Teórica) apresenta os conceitos fundamentais sobre baterias de íon-lítio, sua degradação (SOC/SOH), os métodos de estimação e os componentes de *hardware* utilizados. A Seção III (Desenvolvimento) detalha a metodologia de construção, desde a simulação no *Proteus* até a montagem do protótipo físico e o desenvolvimento do aplicativo. A Seção IV (Resultados e Análise) apresenta e discute os dados obtidos nos testes de validação em laboratório. Por fim, a Seção V (Conclusão) resume os resultados alcançados e discute os impactos do trabalho.

II. Base Teórica

2.1 Baterias de Íons de Lítio

As baterias de íons de lítio tornaram-se a escolha predominante para a indústria automotiva e de veículos elétricos (EVs), incluindo e-scooters [4]. Esta preferência se deve a um conjunto de características superiores em comparação com outras tecnologias, como as de chumbo-ácido.

As principais vantagens das baterias de íons de lítio são sua longa vida útil, o menor impacto ambiental em comparação às tecnologias predecessoras — devido à ausência de metais pesados altamente tóxicos como o chumbo (Pb) e o cádmio (Cd), e principalmente, sua alta densidade energética [6], [21]. A densidade energética de uma bateria de íon-lítio pode atingir até 180Wh/kg [21], um valor significativamente superior ao de outras químicas. Essa comparação pode ser observada também no estudo de Linden e Reddy [11] nas figuras 1 e 2 abaixo:

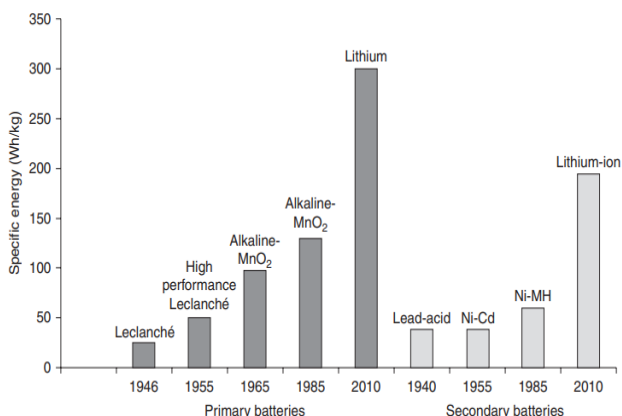


Figura 1: Energia Específica (Wh/kg) em comparação com tecnologias diferentes de bateria. Fonte: [9].

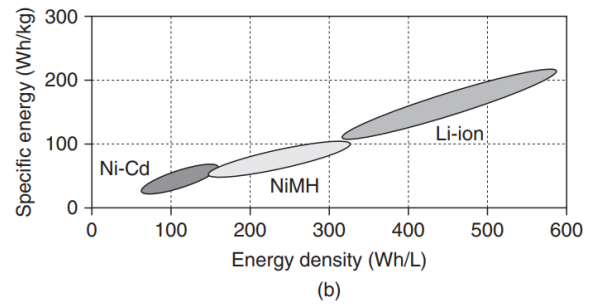


Figura 2: Densidade Energética (Wh/L) e Energia Específica (Wh/Kg) em comparação com tecnologias diferentes de bateria. Fonte: [9].

Em consequência, tornando-as ideais para aplicações em que o peso e o tamanho são fatores críticos [5]. Embora o custo inicial seja mais elevado, o custo por ciclo de carga e descarga é menor, tornando-as economicamente viáveis a longo prazo [5].

Estruturalmente, o que difere os tipos de baterias de íons de lítio é o material utilizado no catodo, sendo os mais comuns o Cobalto e o Manganês [5]. O conceito de funcionamento é frequentemente descrito como "*rocking chair*" (cadeira de balanço), no qual os íons de lítio se movem de um eletrodo para o outro (do anodo para o catodo durante a descarga e o inverso durante a carga) através do eletrólito [5].

2.2 Mecanismos de Degradação e Envelhecimento

Apesar de suas vantagens, as baterias de íons de lítio enfrentam o desafio da degradação, que reduz sua capacidade de armazenar e entregar energia ao longo do tempo [6]. Essa degradação é um processo químico e físico complexo que afeta diretamente a confiabilidade e a vida útil da e-scooter.

A métrica utilizada para quantificar esse envelhecimento é o Estado de Saúde (SOH). O SOH é formalmente definido como a relação percentual entre a capacidade máxima de carga atual da bateria e sua capacidade nominal original, quando nova [4],[5].

$$SOH = \frac{\text{Capacidade Atual}}{\text{Capacidade Nominal}} * 100\%$$

A degradação interna reflete-se diretamente no desempenho macroscópico da bateria. O indicador mais evidente desse desgaste é o decaimento progressivo da capacidade de armazenamento de carga (Ah) em função do uso contínuo. A Figura 3 apresenta dados experimentais que evidenciam essa correlação: nota-se uma tendência de queda consistente na capacidade disponível à medida que o número de ciclos de recarga aumenta. Este comportamento confirma a necessidade de monitoramento constante do Estado de Saúde (SOH), uma vez que a perda de capacidade tende a se acelerar após determinados limiares de envelhecimento.

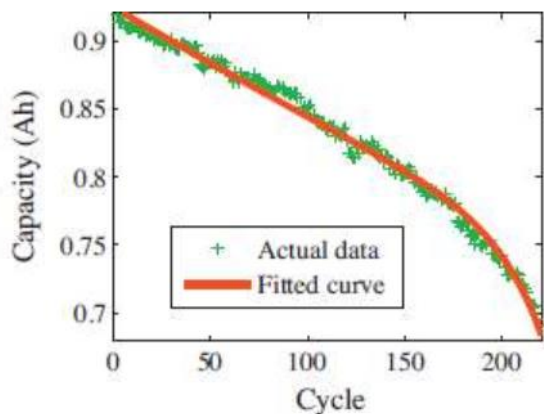


Figura 3: Curva característica de degradação da capacidade de carga (Ah) em função do número de ciclos de recarga realizados. Fonte: [8]

O Fim da Vida Útil (*End of Life - EOL*) de uma bateria em aplicações de veículos elétricos é comumente definido quando o SOH atinge um limite crítico, tipicamente entre 70% e 80%. Abaixo desse limiar, a bateria não só possui uma capacidade reduzida, mas seus ciclos de carga e descarga podem se tornar instáveis [5], justificando sua substituição [4].

A falha em monitorar o SOH e as condições de operação pode levar a trocas prematuras de baterias, aumentando os custos operacionais, ou, em casos graves, a riscos de segurança [6], [4]. A degradação da bateria manifesta-se fisicamente de várias formas, sendo a alteração na impedância interna uma das principais para o monitoramento.

A degradação, seja por ciclagem ou armazenamento em altas temperaturas, causa um aumento significativo na resistência interna DC (corrente contínua) e na impedância AC (corrente alternada) da bateria [7], [5]. Esse aumento de resistência é um indicador de envelhecimento que pode ser medido eletricamente. A lógica de estimativa do SOH desenvolvida neste trabalho baseia-se na medição desta resistência interna DC.

2.2.1 Fatores Operacionais (Temperatura e SOC):

- **Temperatura:** Operar a bateria em altas temperaturas (acima de 60 °C, por exemplo) acelera drasticamente as reações químicas parasitas internas [7]. Essas reações, como a decomposição do eletrólito e a deposição de lítio (*lithium plating*), causam um espessamento da camada de passivação nos eletrodos (conhecida como SEI - *Solid-Electrolyte Interphase*).

Esse espessamento do SEI é uma das principais causas do aumento significativo da resistência interna (mais especificamente, a resistência de transferência de carga e a resistência do filme SEI), o que, por sua vez, leva à queda da capacidade [7].

Em resumo, a alta temperatura causa reações colaterais que aumentam a resistência interna.

- **Estado de Carga (SOC):** Manter a bateria em estados extremos de carga também acelera a degradação. Valores muito altos de SOC (próximos de 100%) tornam a bateria menos estável termicamente [4]. Valores muito baixos (abaixo de 10-20%) podem causar danos irreversíveis [4].

2.2.2 Fatores Químicos e Físicos Internos: Como descrito por [5] a degradação também ocorre através de processos internos inevitáveis, tais como:

- **Dissolução do Material Ativo:** Perda de material nos eletrodos, diminuindo a quantidade de lítio disponível para a reação.
- **Redução do Eletrólito:** O eletrólito se decompõe lentamente, formando camadas passivas que aumentam a resistência interna.
- **Sobrecarga e Troca de Fase:** Operar fora dos limites de tensão seguros pode causar danos estruturais irreversíveis aos eletrodos.

Como explicado no tópico anterior, a operação fundamental das baterias de íon-lítio baseia-se na intercalação reversível de íons (Li+) entre os eletrodos. Contudo, a repetição dos ciclos de recarga impõe estresses mecânicos e químicos que comprometem essa estrutura. Fisicamente, observa-se a ocorrência de fissuras nas partículas (*Particle Cracking*) e a perda de contato elétrico (*Contact Loss*) entre o material ativo e os coletores. Quimicamente, condições de carga extrema podem levar à dissolução de componentes metálicos, como o cobre e metais de transição. O efeito cumulativo desses fenômenos é a formação de camadas passivas resistentes, conhecidas como SEI (*Solid Electrolyte Interphase*), e a criação de zonas mortas ("buracos") no material. Conforme ilustrado na Figura 4, esses fatores atuam em conjunto para elevar a resistência interna da célula, obstruindo o fluxo eficiente de energia e reduzindo a vida útil do componente.

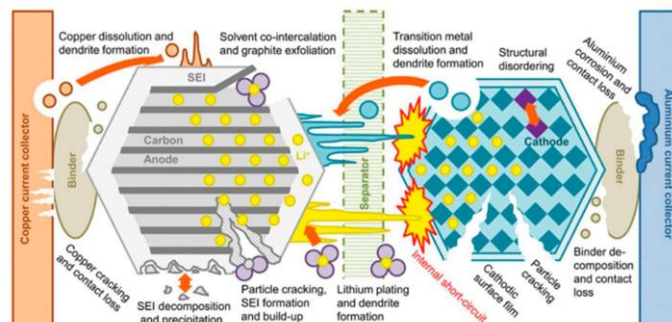


Figura 4: Mecanismos internos de degradação: fraturas físicas, corrosão química e formação de SEI que elevam a resistência interna. Fonte: [10].

2.2.3 Desequilíbrio de Células: Um pacote de bateria de e-scooter é composto por várias células individuais conectadas em série e paralelo. Idealmente, todas as células devem ter características elétricas idênticas.

No entanto, devido a pequenas variações de fabricação ou exposição a diferentes temperaturas, as células podem se desequilibrar, com algumas apresentando tensão diferente das outras.

Isso faz com que, durante a carga ou descarga, algumas células fiquem sobrecarregadas e outras subutilizadas. Uma única célula defeituosa pode comprometer o desempenho e a segurança de todo o pacote de bateria [8].

2.3 Medição de Parâmetros Elétricos

Para estimar com precisão o SOC e o SOH de uma bateria, é imprescindível o monitoramento contínuo de seus principais parâmetros elétricos. Os sistemas de monitoramento de bateria (BMS), como os descritos na

literatura, baseiam seus algoritmos nas leituras em tempo real de tensão e corrente [6],[8]. Este projeto adota sensores específicos para realizar essas medições de forma eficiente e de baixo custo.

2.3.1 Sensor de Tensão – Divisor de Tensão

Um divisor de tensão é um circuito linear simples que produz uma tensão de saída (V_{out}) que é uma fração de sua tensão de entrada (V_{in}). Ele consiste em dois resistores conectados em série, R_1 e R_2 . A tensão de entrada é aplicada em toda a série de resistores e a tensão de saída é medida sobre o resistor R_2 . A relação é dada por (1) [11],[12].

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

Conforme é possível observar no circuito de divisor de tensão da figura 5, com a resistência R_2 , resistência R_1 , Tensão de entrada V_{in} , Tensão de Saída V_{out} .

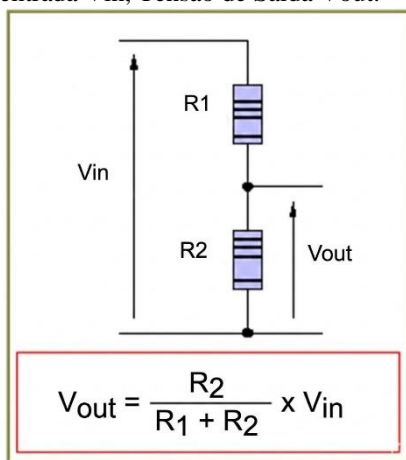


Figura 5: Circuito de divisor de tensão. Adaptado: [11],[13].

Ela serve como parâmetro primário para a estimativa inicial do SOC, para a detecção de condições de sobrecarga ou descarga profunda e é fundamental no cálculo da resistência interna para a estimativa do SOH [5].

2.3.2 Sensor de Corrente – ACS712-30A

O sensor Allegro ACS712 é um circuito integrado monolítico, de baixo custo e alta precisão, projetado para a medição de corrente AC ou DC em sistemas industriais, comerciais e de comunicação [14],[15]. Ele é fornecido em diferentes versões, como 5A, 20A e 30A, que se diferenciam pela corrente máxima de medição e pela sensibilidade da saída [15]. Este sensor opera com base no Efeito Hall.

Desse modo, um condutor interno ao circuito integrado do sensor é posicionado próximo a um transdutor de Efeito Hall. Quando a corrente passa por este condutor, ela gera um campo magnético cuja intensidade é diretamente proporcional à corrente. O transdutor detecta este campo magnético e produz uma tensão de saída analógica que corresponde linearmente à corrente medida.

Com base nessas informações é possível reconhecer todas as funções do circuito interno do sensor Allegro ACS712, ilustrado na figura 6.

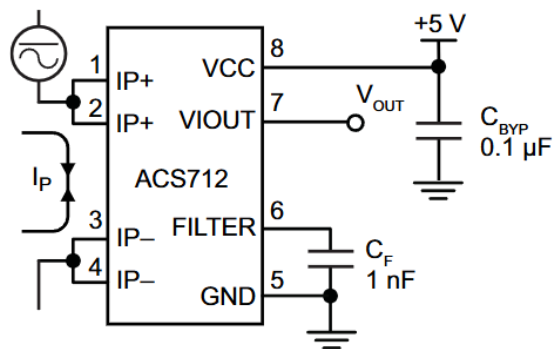


Figura 6: Circuito interno do sensor Allegro ACS712. Fonte: [14].

2.3.2.1 Princípio de Funcionamento: Efeito Hall

Este efeito caracteriza-se pelo aparecimento de um campo elétrico transversal em um condutor quando ele é percorrido por uma corrente elétrica e, ao mesmo tempo, submetido a um campo magnético perpendicular [15]

No interior do ACS712, um condutor de cobre de baixíssima resistência (da ordem de 1,2 mΩ) é posicionado muito próximo à superfície dielétrica de um sensor Hall linear [14].

Quando a corrente principal (seja DC ou AC) passa por este condutor, ela gera um campo magnético proporcional. O circuito Hall detecta este campo e o converte em uma tensão de saída analógica, que é diretamente proporcional à corrente que o gerou [14],[15]. De acordo com a sensibilidade do dispositivo, a tensão de saída será dada por (2).

$$V_{out} = (m I) + \frac{V_{cc}}{2} \quad (2)$$

As principais vantagens do ACS712 para esta aplicação são:

- **Isolamento Galvânico:** O circuito de medição é eletricamente isolado do circuito de potência, pois o sensor Hall não entra em contato direto com o condutor da corrente. [14], [15].
- **Medição Bidirecional:** É capaz de medir tanto a corrente de descarga (positiva) quanto a de carga (negativa) [14].

A medição da corrente é o parâmetro mais crítico para o cálculo preciso do SOC através do método de Contagem de Coulomb [4],[5], que consiste em integrar a corrente que entra e sai da bateria ao longo do tempo. Além disso, a medição da corrente é essencial para a estimativa do SOH, pois o cálculo da resistência interna depende diretamente da corrente de descarga aplicada [5],[7].

2.4 Monitoramento e Telemetria

O monitoramento em tempo real é indispensável para avaliar o desempenho da bateria, otimizar sua utilização e, fundamentalmente, identificar interrupções, danos ou sinais precoces de falha que possam levar a riscos de segurança, como o superaquecimento [8],[4].

Os dados coletados podem ser registrados e armazenados, permitindo análises históricas do desempenho e da condição da bateria [6]. A transmissão desses dados para o usuário ou para uma central é conhecida como telemetria. Com isso a lógica segue o diagrama da figura 7.

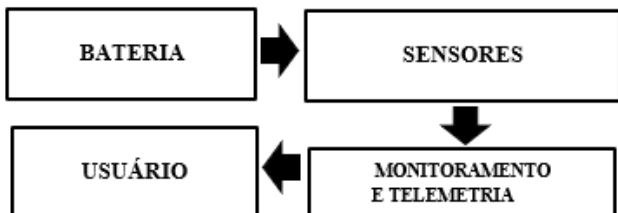


Figura 7: Diagrama de monitoramento e telemetria. Fonte: Autor.

2.4.1. Microcontrolador ESP32-WROOM-32

O avanço dos sistemas embarcados microcontrolados, como as plataformas Arduino e Raspberry Pi, possibilitou a automatização de atividades cotidianas e o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de baixo custo [15]. Uma família de microcontroladores que se destaca neste cenário é a linha ESP, que inclui o ESP8266 e seu sucessor, o ESP32.

O ESP32 é um "sistema em um chip" (SoC) de baixo custo que integra um microprocessador com a pilha completa de protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), oferecendo conectividade Wi-Fi e Bluetooth nativa. Esta arquitetura permite que o chip execute tanto as funções de uma aplicação embarcada quanto as de comunicação sem fio, sem a necessidade de um processador externo [15].

Placas de desenvolvimento baseadas nesses SoCs, como as da família NodeMCU, são projetadas para facilitar a prototipagem, pois integram o chip principal, uma interface USB-Serial para programação e um regulador de tensão (geralmente 3.3V) [15].

Para sistemas de monitoramento, a característica fundamental desses microcontroladores é a presença de conversores analógico-digitais (ADCs) integrados, que permitem a leitura direta de sensores analógicos, como os de tensão e corrente [15].

Na figura 8 é possível observar a pinagem do microcontrolador ESP32-WROOM-32 de 38 pinos, utilizado neste projeto.

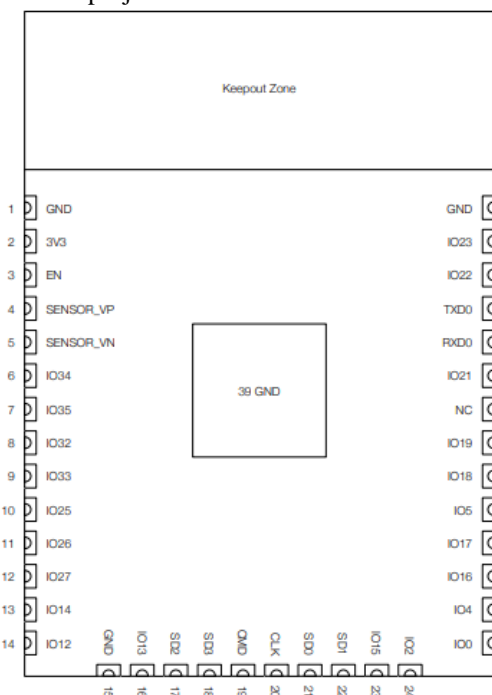


Figura 8: Diagrama de pinos da placa ESP32-WROOM-32. Fonte: [16].

2.4.2 Comunicação

A telemetria, ou seja, a transmissão dos dados medidos para um ponto de análise, é um componente essencial de um sistema de monitoramento inteligente [6]. Tecnologias de comunicação sem fio (*wireless*) são amplamente utilizadas por eliminarem a necessidade de cabos físicos, facilitando a instalação [15].

2.4.2.1 Comunicação Wi-Fi:

Wireless, ou rede sem fio, é uma tecnologia que permite a transmissão de dados e informações sem a necessidade do uso de cabos. Essa comunicação normalmente é feita através de equipamentos de radiofrequência. Seu uso mais comum é em redes de computadores, servindo como meio de acesso à internet através de locais remotos, ou na comunicação entre dispositivos [15].

A sigla WIFI é uma abreviação de "*Wireless Fidelity*" (fidelidade sem fio). É um tipo de rede sem fio que se comunica por meio de ondas de rádio e que não necessita de licença para instalação e/ou operação [15].

Em sistemas de monitoramento, microcontroladores com Wi-Fi integrado podem atuar como "clientes" que enviam dados dos sensores para uma "central de controle" (servidor) ou diretamente para um banco de dados na nuvem [6],[15].

Os dados processados podem então ser disponibilizados ao usuário em uma rede interna, acessível via navegador web [15], ou por meio de aplicativos móveis [6]. Diante disso, a lógica para esta tecnologia segue o diagrama da figura 9.

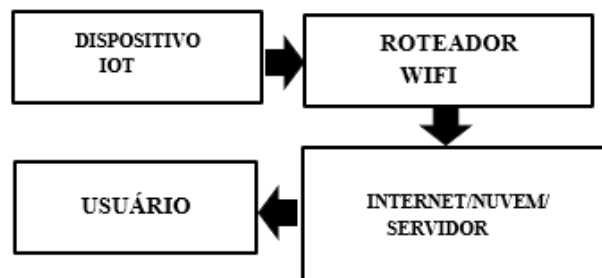


Figura 9: Diagrama de comunicação Wi-Fi com dispositivo de telemetria em IOT (*Internet of Things*). Fonte: Autor

2.4.2.2 Comunicação Bluetooth:

O *Bluetooth* é outra tecnologia de comunicação sem fio projetada para a troca de dados em curtas distâncias. Diferente do Wi-Fi, que visa conectar dispositivos a uma rede de infraestrutura LAN (*Local Area Network*), o *Bluetooth* é focado na comunicação ponto a ponto entre dispositivos [8].

Em aplicações de monitoramento embarcado, ele é frequentemente usado para criar uma "ponte" serial sem fio, convertendo os dados seriais UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) enviados pelo microcontrolador em sinais *Bluetooth*.

Esses dados podem então ser recebidos por uma interface de usuário (GUI) em um *smartphone*, permitindo a visualização em tempo real dos parâmetros do sistema [8].

O ESP32, notavelmente, integra tanto o Wi-Fi quanto o Bluetooth no mesmo chip, oferecendo flexibilidade para ambas as arquiteturas de comunicação [17]. Nesse sentido

a lógica para esta tecnologia segue o diagrama da figura 10.

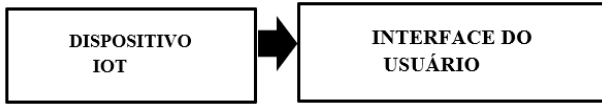


Figura 10: Diagrama de comunicação Bluetooth com dispositivo de telemetria em IOT. Fonte: Autor

2.5 Componentes de Alimentação e Condicionamento de Sinal

Para que os sensores e microcontroladores operem de forma correta e segura, dois desafios de *hardware* precisam ser resolvidos: a alimentação do circuito a partir de uma fonte de maior tensão DC (como a bateria principal do veículo) e o condicionamento dos sinais analógicos (a limpeza e adaptação dos sinais dos sensores) antes da leitura.

2.5.1 Regulador de Tensão Chaveado LM2596

O **LM2596** é um circuito integrado monolítico projetado para funcionar como um regulador chaveado redutor de tensão (*step-down* ou "*buck converter*") [18]. Suas principais características são:

- **Alta Eficiência:** Sendo um regulador chaveado, sua eficiência é significativamente maior em comparação com reguladores lineares, especialmente com tensões de entrada elevadas [18].
- **Ampla Faixa de Entrada:** É capaz de operar com uma tensão de entrada de até 40V (com um limite máximo absoluto de 45V), sendo ideal para sistemas automotivos ou de baterias de maior tensão [18].
- **Capacidade de Corrente:** É capaz de fornecer uma corrente de carga de até 3,0A, suficiente para alimentar um microcontrolador e múltiplos sensores [18].
- **Frequência de Chaveamento:** Opera a uma frequência fixa de 150 kHz, o que permite o uso de componentes de filtro (indutores e capacitores) de tamanho reduzido [18].
- **Proteções Integradas:** O componente inclui proteções essenciais para sistemas robustos, como limite de corrente ciclo a ciclo e desligamento térmico (*thermal shutdown*), que protege o circuito em caso de falha ou superaquecimento [18].

Dessa forma, tem-se o circuito elétrico interno deste regulador em sua aplicação típica, ilustrado na figura 11.

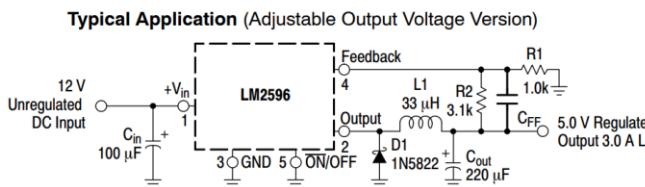


Figura 11: Aplicação típica para regulador de tensão LM2596. Fonte: [18].

2.5.2 Amplificador Operacional LM358

A leitura de sensores analógicos em um ambiente real raramente é ideal. Os sinais podem ser fracos, ter *offsets* de tensão ou, mais comumente, estar contaminados com ruído elétrico vindo de motores ou fontes chaveadas. Para corrigir isso, utiliza-se o condicionamento de sinal,

frequentemente implementado com amplificadores operacionais (*amp-ops*) [19],[20].

O LM358 é um circuito integrado que contém dois amplificadores operacionais independentes de alta performance [20]. Ele possui vantagens distintas que o tornam ideal para aplicações de sensores.

- **Operação com Fonte Única (*Single Supply*):** Sua principal vantagem é a capacidade de operar com uma única fonte de alimentação (de 3V até 32V) [20]. Diferente de *amp-ops* clássicos que exigem fontes simétricas (+12V e -12V), o LM358 pode operar apenas com 5V e GND, o que simplifica o projeto [20].
- **Faixa de Entrada Estendida ao Terra:** A faixa de entrada de modo comum do LM358 se estende até a alimentação negativa (GND/VEE). Isso é crucial para medir sinais de sensores que operam perto de 0V, sem a necessidade de componentes externos para criar uma tensão de polarização (*bias*) [20].
- **Baixo Consumo:** Possui um baixo consumo de corrente quiescente [20].
Em sistemas de monitoramento, o LM358 é tipicamente usado em duas configurações:
- **Filtro Ativo:** Configurado como um filtro (ex: *Sallen-Key* ou *Bi-Quad*), ele pode remover ativamente o ruído de alta frequência de um sinal como o do ACS712-30A, fornecendo uma leitura muito mais estável para o ADC do microcontrolador [20].
- **Seguidor de Tensão (*Buffer*):** Nesta configuração, o amp-op fornece um ganho unitário (ganho = 1) e atua como um isolador. Ele copia a tensão de um ponto (como um divisor de tensão) e a entrega ao pino do ADC, garantindo que a leitura não seja afetada pela impedância de entrada do microcontrolador [19].
Para isso é necessário compreender e analisar o circuito lógico do amplificador, bem como sua alimentação, ilustrado na figura 12 e figura 13.

PIN CONNECTIONS

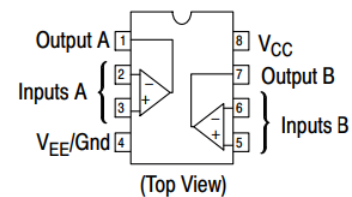


Figura 12: Conexão de pinos para LM358 (*top view*). Fonte: [20].

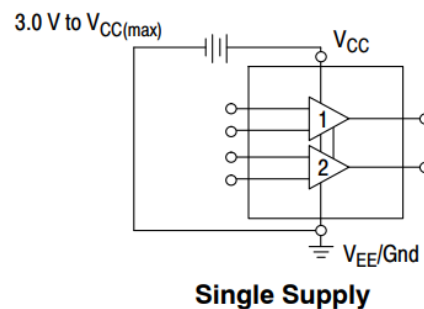


Figura 13: Alimentação única para o LM358. Fonte: [20].

2.6 Ferramentas de Simulação de Sistemas Embarcados

O desenvolvimento de sistemas embarcados, que integram *hardware* (circuitos eletrônicos) e *software* (*firmware*), apresenta desafios únicos de depuração. Erros no *firmware* podem causar comportamentos inesperados no *hardware*, e falhas no *hardware* podem ser difíceis de diagnosticar apenas analisando o código. Tradicionalmente, a depuração é realizada no protótipo físico, um processo que pode ser custoso e demorado.

Uma alternativa moderna é o uso de ambientes de simulação avançados, que permitem a prototipagem virtual do sistema antes da montagem física.

2.6.1 O Software Proteus VSM

O *Proteus Design Suite*, desenvolvido pela *Labcenter Electronics*, é um ambiente de *software* para o projeto e simulação de circuitos eletrônicos. Sua principal ferramenta para o desenvolvimento de sistemas embarcados é o VSM (*Virtual System Modelling*), ou Modelagem de Sistema Virtual [21].

O diferencial do VSM é a sua capacidade de realizar a co-simulação *hardware-software*. Diferente de simuladores de circuito tradicionais como o SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*), o *Proteus VSM* não simula apenas o comportamento elétrico dos componentes passivos; ele emula o funcionamento de microcontroladores complexos, como os da família AVR (Arduino), PIC e ARM (incluindo o ESP32) [21].

III. Desenvolvimento

O objetivo deste tópico é descrever o processo de concepção, simulação e construção do protótipo de monitoramento, detalhando as escolhas de *hardware* e *software* que permitiram a implementação dos conceitos teóricos de estimação de Estado de Carga (SOC) e Estado de Saúde (SOH).

A metodologia foi dividida em quatro etapas principais: modelagem virtual, desenvolvimento do protótipo físico, desenvolvimento da interface de comunicação e a metodologia de testes.

3.1 Modelagem do Circuito no Proteus

A primeira etapa do desenvolvimento consistiu na criação de um modelo virtual completo do sistema de *hardware* no *software Proteus Design Suite*. Conforme discutido na fundamentação teórica, a utilização de um ambiente de Modelagem de Sistema Virtual (VSM) é uma metodologia que permite a co-simulação de *hardware* e *software*, validando a interação entre o *firmware* e o circuito eletrônico antes da montagem física [21].

O circuito virtual modelado no *Proteus* buscou replicar os componentes centrais do projeto. Isso incluiu:

Um modelo de Bateria DC (para simular a fonte de 36V-42V), ilustrado na figura 14 com o circuito implementando no *software Proteus*.

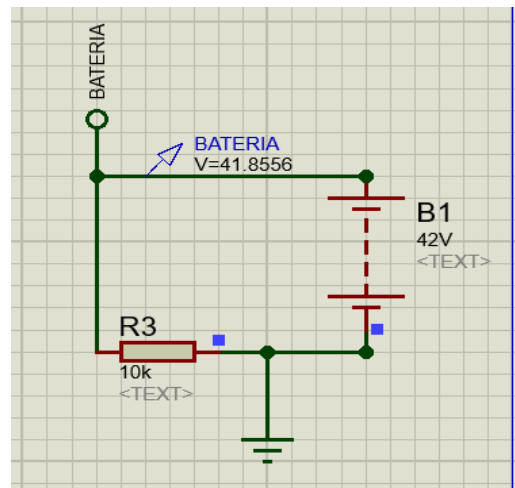


Figura 14: Modelo de Bateria DC 42V para simulação no *software Proteus*. Fonte: Autor.

Um modelo do sensor de corrente ACS712-30A, conforme mostra a figura 15.

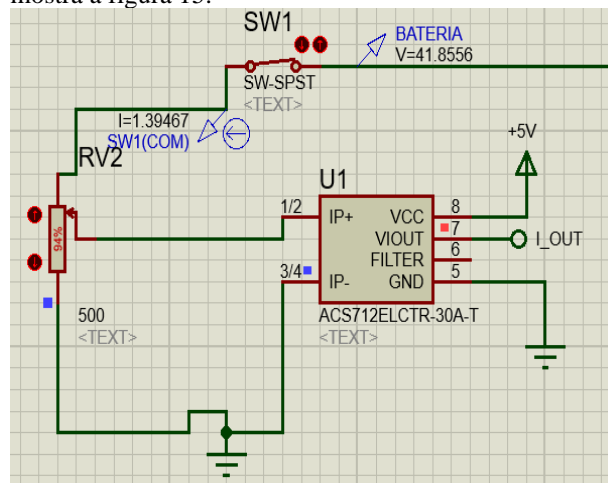


Figura 15: Modelo de sensor de corrente com ACS712-30A, para simulação no *software Proteus*. Fonte: Autor.

O circuito divisor de tensão para a medição da tensão da bateria. Como indica a figura 16.

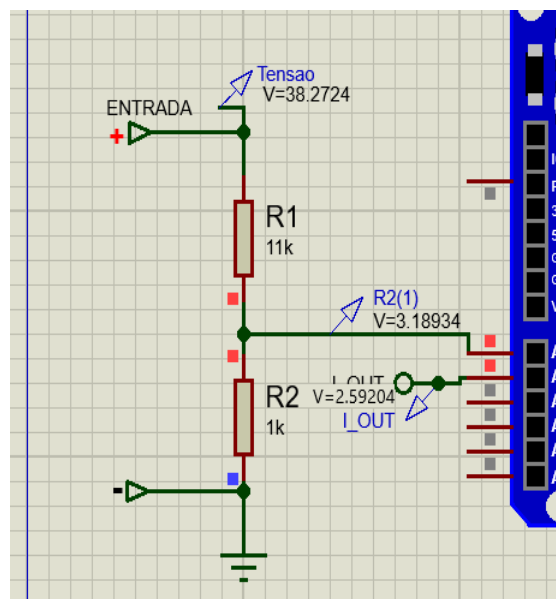


Figura 16: Modelo de circuito divisor de tensão para simulação no *software Proteus*. Fonte: Autor.

Para a simulação da unidade central de processamento, optou-se pela utilização do microcontrolador Arduino Uno (baseado na arquitetura AVR) em substituição ao ESP32. Essa adaptação estratégica fez-se necessária devido à indisponibilidade de modelos de simulação nativos e estáveis para o *System on a Chip* (SoC) ESP32 no ambiente do *software Proteus VSM*.

Ressalta-se que, apesar das diferenças de *hardware*, a validação lógica não foi comprometida, uma vez que os algoritmos fundamentais de leitura de sensores e as equações de estimativa de SOC e SOH foram desenvolvidos em linguagem C, sendo portáveis entre as duas plataformas. Desta forma, o Arduino Uno atuou como uma plataforma de validação algorítmica, permitindo a verificação matemática do *firmware* antes da implementação física, conforme detalhado na Figura 17.

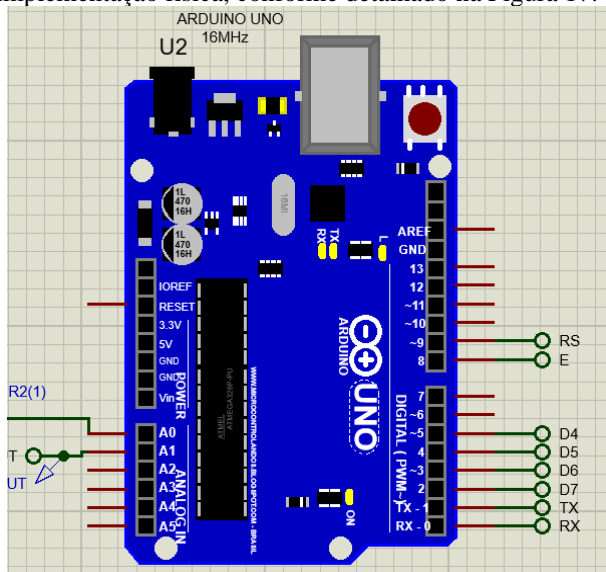


Figura 17: Modelo do microcontrolador Arduino UNO para simulação no *software Proteus*. Fonte: Autor.

Por fim, integrou-se ao projeto o modelo do regulador de tensão chaveado LM2596. Na etapa de simulação, este componente desempenha a função crítica de conversor *step-down*, rebaixando a tensão de entrada proveniente do modelo de bateria (42V) para uma saída regulada de 5V. Essa adaptação é indispensável para garantir a alimentação correta e segura do microcontrolador e dos sensores, validando a estabilidade da fonte de energia antes da montagem física. A configuração esquemática adotada no *software Proteus* é apresentada na Figura 18.

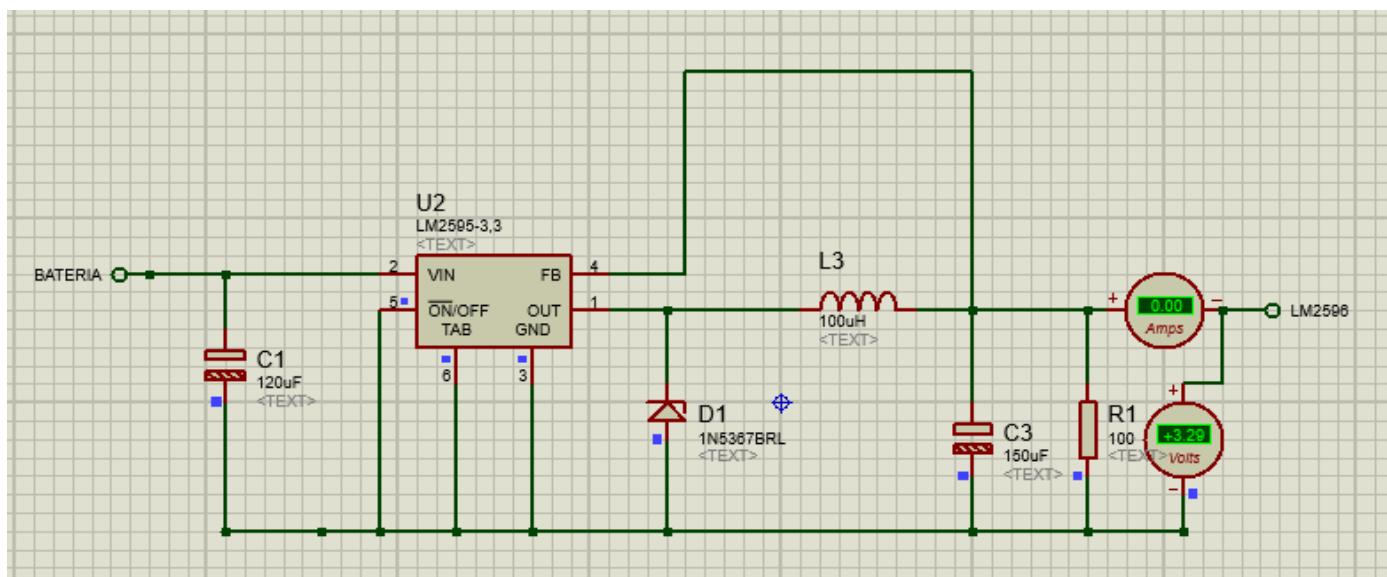


Figura 18: Modelo do regulador de tensão LM2596 para simulação no *software Proteus*. Fonte: Autor.

Ressalta-se que o ambiente de simulação *Proteus VSM* opera em condições ideais, isento de interferências eletromagnéticas, ruídos térmicos ou *offsets* de conversão (ADC) inerentes ao *hardware* real [15]. Devido a essa estabilidade intrínseca do sinal virtual gerado pelo modelo do ACS712, a implementação de etapas de

condicionamento de sinal, como filtros ativos [20], foi dispensada nesta fase preliminar.

Consequentemente, o objetivo central da simulação restringiu-se à validação da lógica computacional e da arquitetura de *firmware*, com foco nos seguintes pontos:

- **Validação dos Cálculos Matemáticos:** Verificar a precisão da aquisição de dados, assegurando que a leitura dos divisores de tensão e a conversão das grandezas elétricas fossem processadas corretamente pelo microcontrolador.
- **Validação dos Algoritmos de Estado:** Testar a resposta das rotinas de estimativa, especificamente a Contagem de Coulomb (para variação do SOC) e o algoritmo de SOH — que monitora o transiente de partida do veículo (popularmente denominado 'arrancada') para capturar a queda de tensão sob carga e inferir a resistência interna.
- **Validação da Telemetria:** Certificar a integridade da formatação de saída, garantindo que os pacotes de dados fossem estruturados e transmitidos via porta serial conforme o protocolo estabelecido.

Os resultados preliminares desta etapa de validação virtual são apresentados na Figura 19, que exibe o registro de saída (log) do monitor serial. A imagem comprova a execução correta da lógica de firmware e a integridade dos dados antes da montagem física.

O protocolo de comunicação visualizado na figura 19 segue uma estrutura padronizada de telemetria, concatenando as variáveis monitoradas no seguinte formato:

[Tempo Decorrido] | V: Tensão (Volts) | I: Corrente (Amperes) | SOC: Estado de Carga (%) | P: Potência (Watts) | SOH: Estado de Saúde (%) | Energia: Consumo Acumulado (Wh)

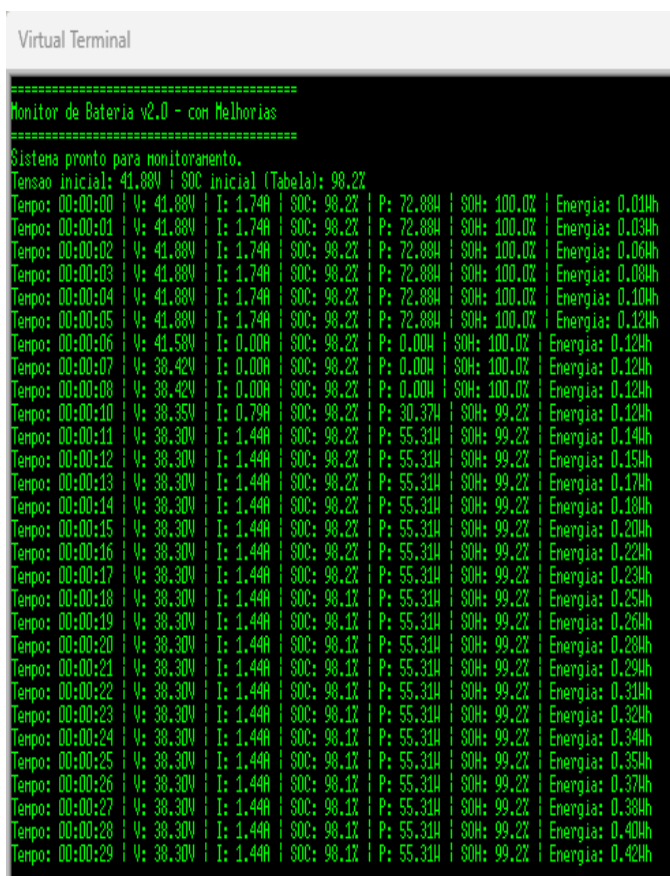


Figura 19: Leitura pelo terminal serial do RX-TX (Receive-Transmit) do Arduino UNO na simulação no software Proteus. Fonte: Autor.

O ensaio foi segmentado em quatro eventos temporais distintos para verificar a robustez dos algoritmos de estimação:

Tempo 00:00:00 (Inicialização e OCV): No instante em que o sistema é energizado, o algoritmo realiza a leitura da tensão em circuito aberto (Open Circuit Voltage - OCV). Observa-se que, para uma tensão lida de 41,88 V, o sistema consulta a tabela de referência interna e estima corretamente o SOC inicial em 98,2%, estabelecendo o ponto de partida para a integração.

Tempo 00:00:06 (Estado de Repouso): Foi simulada uma interrupção na carga (desligamento do motor). O sensor reporta 0,00 A e o firmware reconhece o estado de repouso. Neste momento, o algoritmo de Contagem de Coulomb cessa a integração e a lógica de 'Zona Morta' atua para evitar que ruídos sejam contabilizados como consumo.

Tempo 00:00:10 (Dinâmica de Carga/Arrancada): Simula-se a partida do veículo. O sistema detecta a elevação abrupta da corrente (de 0 A para 0,79 A e estabilizando em 1,44 A). É neste transiente que o algoritmo de SOH monitora a queda de tensão instantânea para calcular a resistência interna. Simultaneamente, o sistema passa a calcular a Potência Elétrica (~55 W).

Tempo 00:00:29 (Descarga e Integração): Após um período de consumo contínuo de 1,44 A, observa-se o decaimento do SOC de 98,2% para 98,1%. Este resultado valida a execução correta da integral de corrente no tempo (Contagem de Coulomb), confirmando que o dispositivo é capaz de rastrear a perda de capacidade da bateria em tempo real."A obtenção de resultados satisfatórios na simulação, onde os valores de SOC e SOH responderam como esperado (conforme Figura 17), foi o critério de aprovação que validou o design do circuito e a lógica do *firmware*, permitindo avançar com confiança para a construção do protótipo físico.

A partir desta validação de resultados, tem-se o circuito de simulação completa no *software Proteus* conforme a figura 20

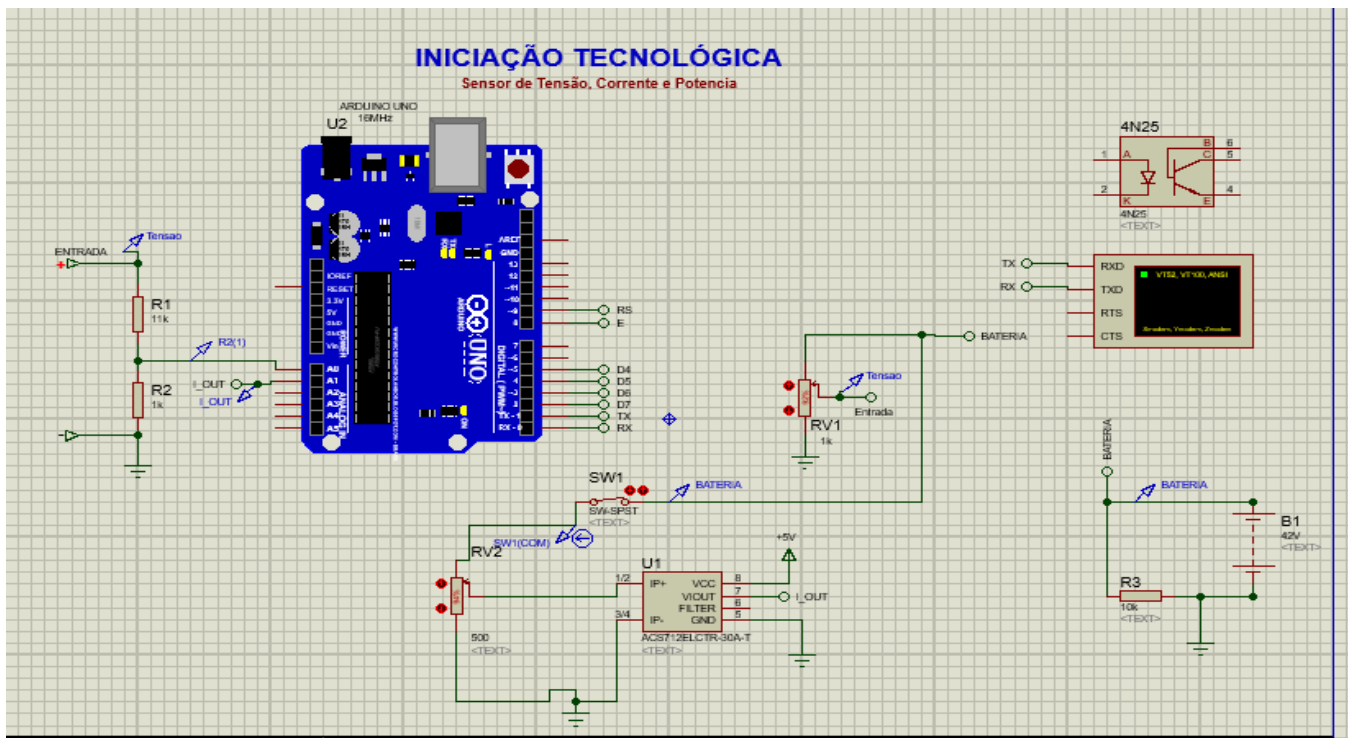


Figura 20: Visão geral do dispositivo de telemetria e monitoramento de bateria de e-scooter na simulação do *software Proteus*. Fonte: Autor.

3.2 Desenvolvimento do protótipo

A segunda etapa consistiu na implementação física (*hardware*) do circuito em protoboard. Esta fase focou em traduzir o modelo validado no *Proteus* para o mundo real, utilizando os componentes finais do projeto e lidando com os desafios práticos que não existem na simulação.

As principais diferenças e adições em relação ao modelo simulado foram:

3.2.1. Seleção do Microcontrolador

O microcontrolador do protótipo é o ESP32-WROOM-32 (38 pinos). Esta escolha se justifica por ser um SoC (Sistema em um Chip) de baixo custo que, além de possuir um ADC de 12 bits para a leitura dos sensores, já integra nativamente a comunicação *Bluetooth*, um dos requisitos de telemetria do projeto.

3.2.2. Desafios Práticos: Ruído e Offset

Ao contrário da simulação "limpa", os testes iniciais em bancada revelaram que os sinais analógicos reais eram instáveis

- **Ruído no Sensor de Corrente:** A saída do ACS712 mostrou-se altamente suscetível a ruído elétrico, gerando leituras "fantasmas" mesmo em repouso.

- **Offset do ADC do ESP32:** Conforme visto nos testes de depuração posteriormente, os pinos ADC do ESP32 apresentaram um *offset* de tensão, lendo um valor não-nulo mesmo quando aterrados.

3.2.3 Correções de *Hardware* e *Software* Implementadas

Para resolver os desafios do mundo real, o protótipo físico exigiu a adição de circuitos que não eram necessários na simulação:

- **Regulador de Tensão (LM2596):** A implementação física exigiu este conversor step-down para reduzir a tensão da bateria (42V) para 5V estáveis. Isso garante a alimentação segura do ESP32 e dos sensores, eliminando flutuações que poderiam afetar a medição.

- **Adaptação de Nível (Divisor 10kΩ/10kΩ):** Este divisor foi necessário para rebaixar o sinal de saída de 5V do ACS712 para a faixa de 3.3V do ADC do ESP32. O circuito atenua o sinal pela metade, protegendo a porta analógica sem comprometer a linearidade da leitura.

- **Filtro Ativo (LM358):** Para combater o ruído do ACS712, foi implementado um filtro ativo passa-baixa (com um capacitor de 100nF) e um *buffer* (seguidor de tensão) usando o amplificador operacional LM358, que é ideal por sua capacidade de operar com fonte única (*single supply*).

- **Calibração de *Software*:** Visto que as correções de hardware não eliminam erros sistemáticos, como a não-linearidade do ADC e as tolerâncias dos componentes, o firmware foi aprimorado com uma camada de inteligência. Implementaram-se rotinas de autocalibração na função `setup()`, que realizam a amostragem do ruído de fundo e determinam matematicamente o offset (ponto zero real) de tensão e corrente a cada inicialização, assegurando a precisão dos dados desde o primeiro instante de operação.

Desse modo com todos os ajustes implementados no protótipo real do dispositivo, como ilustra a figura 21.

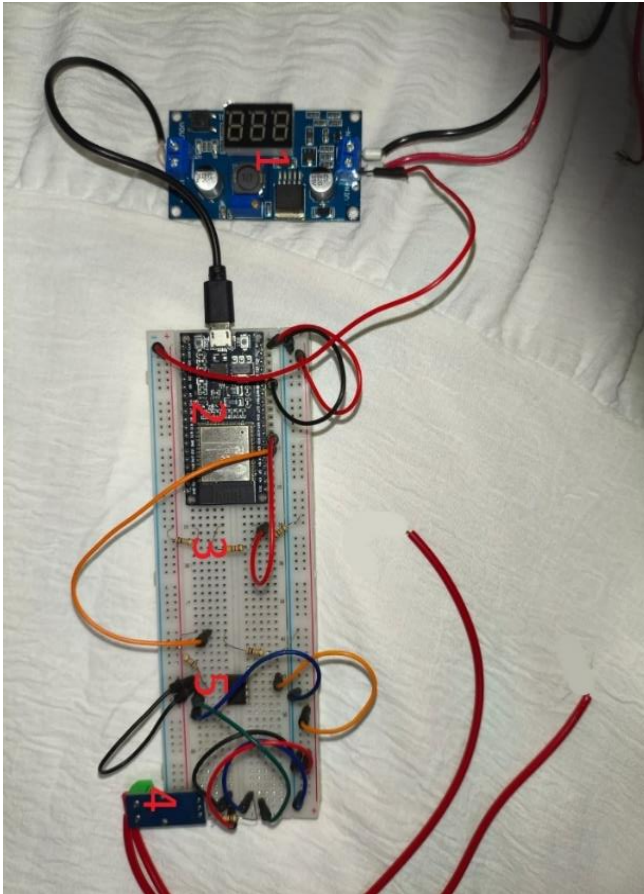


Figura 21: Visão geral do dispositivo de telemetria e monitoramento de bateria de e-scooter no protótipo real. Fonte: Autor.

Legenda:

1) Regulador de tensão LM2596: É utilizado para alimentar o microcontrolador ESP32 através de sua entrada *micro-USB*, fornecendo uma tensão regulada e ajustada de +5V.

2) Microcontrolador ESP32-WROOM-32 (38 Pinos): Executa toda a lógica programada do dispositivo, processando os dados dos sensores e controlando os atuadores.

3) Divisor de Tensão (Sensor de Tensão): Possui a função de adaptar a tensão da bateria (que também alimenta o LM2596) para um nível compatível com a porta analógica (ADC) do ESP32, que opera com 3,3V. Para a implementação, o resistor superior (R1) é formado pela soma de 10kΩ e 4,7kΩ (14,7kΩ) e o resistor inferior (R2) é de 1kΩ. Com a tensão máxima da bateria (42V), a saída do divisor atinge no máximo 2,675V, garantindo uma margem de segurança.

4) ACS712 (Sensor de Corrente): Mede a corrente da carga via efeito Hall e gera uma tensão de saída proporcional (até 5V). Como a entrada analógica do ESP32 tem um limite de 3,3V, foi implementado um divisor de tensão (10kΩ/10kΩ) entre a saída (Vout) do sensor e a GPIO (*General-Purpose Input/Output*). Esse divisor atenua a tensão pela metade (0-2,5V), garantindo um nível seguro. O *software*, por sua vez, deve compensar matematicamente essa divisão.

5) LM358 (Condicionamento de Sinais): Este componente é um amplificador operacional (*AmpOp*). No protótipo, ele é utilizado como um filtro ativo e seguidor de tensão para filtrar ruídos do sinal do ACS712 antes de enviá-lo ao ADC.

3.3 Estrutura dos Algoritmos Embarcados

Esta seção detalha a arquitetura lógica do *firmware* desenvolvido. A estruturação do código foi segmentada em três blocos funcionais distintos, visando garantir a estabilidade da aquisição de dados e a precisão das estimativas de estado da bateria. O funcionamento do sistema é regido pelas seguintes rotinas: Inicialização e Calibração (*Setup*), Aquisição e Tratamento de Sinais (*Loop*) e Algoritmos de Estimativa de Estado (SOC e SOH).

3.3.1 Inicialização e Calibração (*Setup*)

O algoritmo de inicialização é executado automaticamente assim que o microcontrolador é energizado (*power-on*). Sua função primordial, além da configuração dos periféricos de comunicação e GPIOs, é realizar a calibração estática do sistema. Nesta etapa, o *firmware* realiza múltiplas leituras do sensor de corrente em vazio para identificar e eliminar o erro de *offset* (desvio de ponto zero), assegurando que as medições subsequentes partam de uma referência precisa. Conforme demonstrado no Quadro 1.

Algoritmo 1: Inicialização e Calibração dos Sensores

```

INÍCIO
    Configurar GPIOs (32: Tensão, 35:
    Corrente) e Comunicação (Serial/BT)

    // Rotina de Calibração de Corrente
    (Requer carga desligada)
    Soma = 0
    PARA i DE 0 ATÉ 500 FAÇA:
        Ler valor bruto do ADC (Corrente)
        Soma = Soma + Valor_Lido
        Aguardar 2ms
    FIM PARA
    Média_ADC = Soma / 500
    Ponto_Zero_V =
    Converter_ADC_para_Volts(Média_ADC) // Salva
    referência de 0A

    // Estimativa Inicial
    Ler Tensão da Bateria
    Definir SOC_Inicial com base na tensão
    (Tabela OCV)
    FIM
    
```

Quadro 1: Pseudocódigo do algoritmo de inicialização. Fonte: Autor

3.3.2 Aquisição e Tratamento de Sinais (*Loop*)

No *loop* principal, o sistema realiza a leitura contínua dos sensores, aplicando filtros digitais para estabilidade. Conforme demonstrado no quadro 2.

Algoritmo 2: Leitura e Filtragem

```

ENQUANTO (Sistema Ligado) FAÇA:
  // Leitura de Tensão
  Tensão_Lida = Ler_ADC(GPIO 32) *
Fator_Divisor
  Tensão_Final =
Filtro_Exponencial(Tensão_Lida,
Tensão_Anterior)

  // Leitura de Corrente
  Tensão_Sensor = Ler_ADC(GPIO 35)
  // Correção de Polaridade (Módulo da
diferença)
  Diferença_V = ABSOLUTO(Tensão_Sensor -
Ponto_Zero_I)
  Corrente_Final = Diferença_V /
Sensibilidade (0.066 V/A)

  // Zona Morta (Supressão de ruído)
  SE (Corrente_Final < 0.2A) ENTÃO
Corrente_Final = 0.0

  Calcular Potência = Tensão_Final *
Corrente_Final
  Atualizar dados no Display/App
FIM ENQUANTO
    
```

Quadro 2: Pseudocódigo do algoritmo de Loop. Fonte: Autor

3.3.3 Algoritmos de Estimativa de Estado (SOC e SOH)

Este bloco contém a inteligência do sistema: a Contagem de Coulomb para o nível de carga e a detecção de transientes de partida para avaliar a saúde da bateria. Conforme demonstrado no quadro 3.

```

ENTRADA: Tensão, Corrente,
Tempo_Decorrido

  // Cálculo de SOC (Contagem de Coulomb)
  Energia_Gasta = Corrente *
Tempo_Decorrido
  Capacidade_Atual = Capacidade_Anterior -
Energia_Gasta
  SOC = (Capacidade_Atual /
Capacidade_Nominal) * 100

  // Cálculo de SOH (Resistência Interna na
"Arrancada")
  SE (Corrente > Limiar_Partida) E
(Estado_Anterior == REPOUSO) ENTÃO:
  Aguardar estabilização (500ms)
  Queda_Tensão = Tensão_Repouso -
Tensão_Carga

  SE (Corrente > 0) ENTÃO:
  Resistência_Interna =
Queda_Tensão / Corrente
  SOH = Mapear(Resistência_Interna,
Ref_Nova, Ref_Velha)
  FIM SE
  Estado = EM_USO
SENÃO SE (Corrente == 0) ENTÃO:
  Estado = REPOUSO
  Atualizar Tensão_Repouso
  FIM SE
    
```

Quadro 3: Pseudocódigo do algoritmo de SOC e SOH. Fonte: Autor

3.4 Desenvolvimento do Aplicativo Bluetooth

Um requisito fundamental para um sistema de monitoramento de veículos elétricos é a capacidade de apresentar os dados de telemetria ao usuário em tempo real [8],[6]. Enquanto a simulação no *Proteus* utilizou um terminal virtual e os testes de *hardware* iniciais usaram o Monitor Serial do computador, é necessário um método de visualização portátil para a aplicação final na *e-scooter*.

A literatura aponta para o uso de aplicativos móveis em *smartphones* como a solução ideal para essa interface gráfica do usuário (GUI) [8],[6]. Para este TCC, optou-se pelo desenvolvimento de um aplicativo Android dedicado, utilizando a plataforma *MIT App Inventor*.

3.4.1 Escolha da Plataforma (MIT App Inventor)

O *MIT App Inventor* é uma plataforma de desenvolvimento *online* projetada para democratizar a tecnologia e ensinar conceitos de pensamento computacional através da criação de aplicações móveis [22]. A plataforma é baseada em um editor "*What You See Is What You Get*" (*WYSIWYG*) para o *design* da interface e uma linguagem de programação visual em blocos [22].

A escolha desta ferramenta para o presente trabalho foi estratégica. Ambientes de desenvolvimento tradicionais para aplicações móveis, como *Android Studio* (utilizando Java), exigem um conhecimento aprofundado em sintaxe de programação textual e gerenciamento de bibliotecas [22]. O *MIT App Inventor*, ao contrário, abstrai essa complexidade, permitindo que o foco seja direcionado para a lógica do problema [22]. A plataforma é ideal para a prototipagem rápida de sistemas que interagem com *hardware* externo, como módulos Arduino ou ESP [22], alinhando-se perfeitamente aos objetivos de baixo custo e eficiência deste TCC.

3.4.2 Estrutura e Lógica do aplicativo

O desenvolvimento no *MIT App Inventor* é dividido em duas interfaces principais:

- **Design Editor:** Utiliza uma interface visual de arrastar e soltar [22], projetou-se um layout minimalista e funcional. A interface integra um componente *ListPicker* para a seleção do dispositivo *Bluetooth* (ESP32) e um conjunto de *Labels* (rótulos) para a exibição em tempo real dos dados de telemetria, conforme ilustrado na Figura 22.

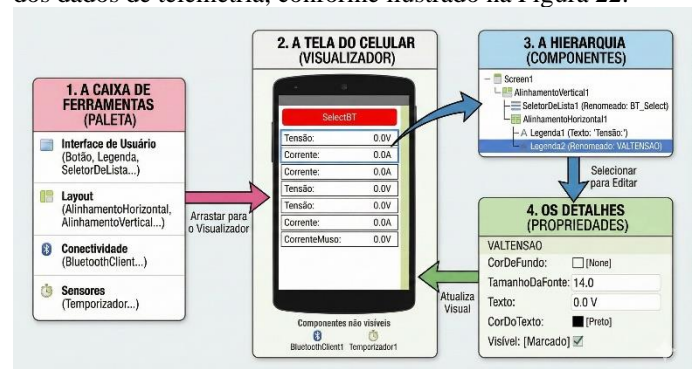


Figura 22: Construção do aplicativo móvel Bluetooth pela plataforma *MIT App Inventor*, aba de design. Fonte: Autor.

- **Blocks Editor:** Um ambiente onde a lógica do aplicativo é programada conectando-se blocos coloridos [22]. Conforme mostra na figura 23 da plataforma *MIT App Inventor*.

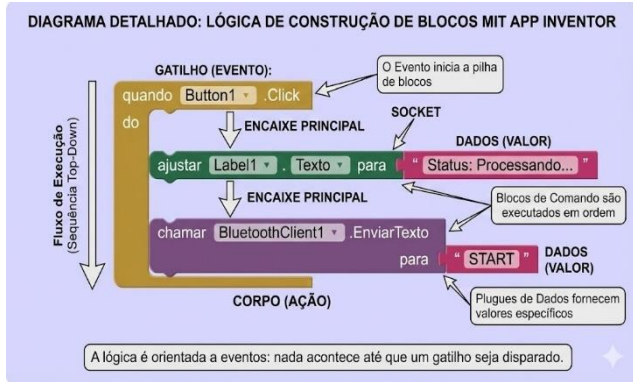


Figura 23: Construção do aplicativo móvel Bluetooth pela plataforma MIT App Inventor na aba de editor de blocos. Fonte: Autor.

A lógica de comunicação do aplicativo foi projetada para pairar com o módulo Bluetooth do ESP32, que atua como um Perfil de Porta Serial (SPP) [8]. O firmware do ESP32 envia uma string de dados formatada. No editor de blocos do App Inventor, um componente "Clock" (Relógio) é usado para verificar continuamente a chegada de dados. Quando uma string completa é recebida, ela é processada usando blocos de texto para dividir a string (parsing) e, em seguida, os valores individuais são usados para atualizar os rótulos de texto na tela, fornecendo ao usuário um painel de telemetria em tempo real, como pode ser observado na figura 24.



Figura 24: Design do aplicativo móvel Bluetooth e validação da conexão com o microcontrolador. Fonte: Autor.

Desta forma a lógica de conexão Bluetooth e, principalmente, os blocos que recebem a string, usam o "split at" e atualizam os campos de texto.

Como resultado da construção deste aplicativo, tem-se a lógica do diagrama de blocos utilizado na programação, de maneira a ser possível a telemetria com o dispositivo em tempo real e via Bluetooth, ilustrado nas figuras 25:

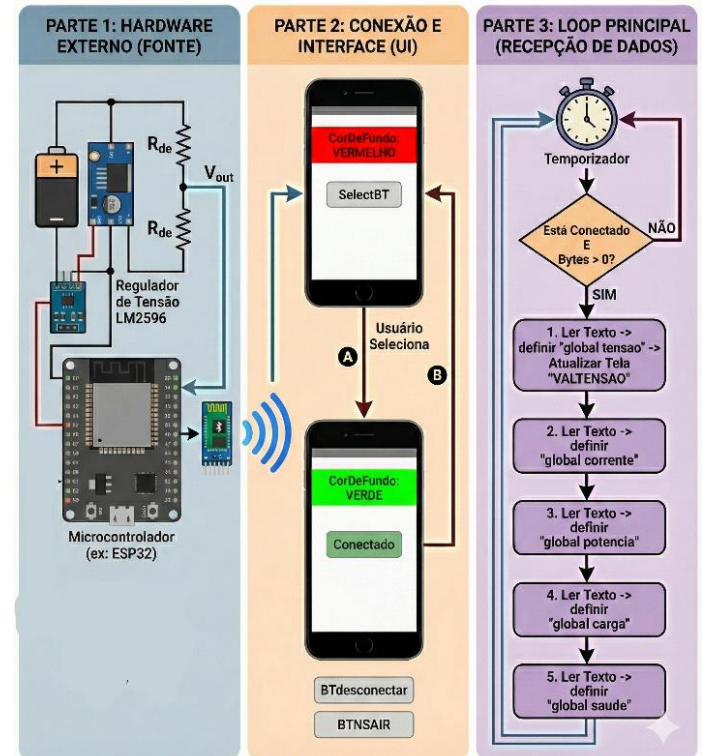


Figura 25: Diagrama explicativo sobre a lógica do APP para monitoramento e telemetria do dispositivo. Fonte: Autor.

IV. Resultados e Análise

Esta seção apresenta os resultados experimentais obtidos a partir do protótipo de hardware e software descrito no capítulo anterior. Os testes foram realizados na bancada do Laboratório de Ensaios de Pequenos Motores (LENP-MOT) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG e tiveram como objetivo validar a eficácia dos circuitos de condicionamento de sinal, a precisão dos algoritmos de calibração de software e a funcionalidade geral do sistema de monitoramento e telemetria.

4.1 Teste: Validação dos Sensores

Metodologia: O teste visou validar a precisão das leituras de tensão, corrente e potência sob uma carga conhecida e estável, simulando o comportamento da bateria. Foi utilizada uma fonte de alimentação DC de laboratório para simular a bateria e uma resistência de potência de 38,3Ω, conforme medido com um ohmímetro no teste, para simular o consumo do motor.

O circuito foi montado da seguinte forma:

1. Uma fonte DC inicialmente ajustada para 42V (simulando a tensão máxima da bateria), que posteriormente foi ajustada para os testes, e conectada à entrada do regulador LM2596[18] e ao divisor de tensão.
2. O ESP32 e os sensores foram alimentados pelo LM2596.

3. O sensor ACS712 [14] foi conectado em série com a resistência de carga de $38,3\Omega$ de potência. O circuito de carga foi então alimentado pela mesma fonte de tensão.

4. Um multímetro foi usado para aferir a tensão real da fonte e um amperímetro para medir a corrente real no circuito de carga.

Cálculo Teórico Esperado na Tensão Máxima da Bateria:

- Tensão (V) = 42V
- Resistência (R) = $38,3\Omega$
- Corrente ($I = V/R$) = $42V / 38,3\Omega = 1,10A$
- Potência ($P = V*I$) = $42V * 1,10A = 46,2W$

Montagem do Circuito de Teste e Conexão com o Aplicativo: Os dados de telemetria foram observados em tempo real no aplicativo de *smartphone* via *Bluetooth*. Os valores medidos pelo sistema, após a calibração inicial, foram comparados com os instrumentos de referência.

Conforme mostram nas figuras 26 e 27, o protótipo na bancada de testes conectado em uma fonte DC ajustada primeiramente em 42V, com a carga de 38.3Ω , bem como a dos resultados no aplicativo móvel na figura 28, utilizado para validação dos testes.

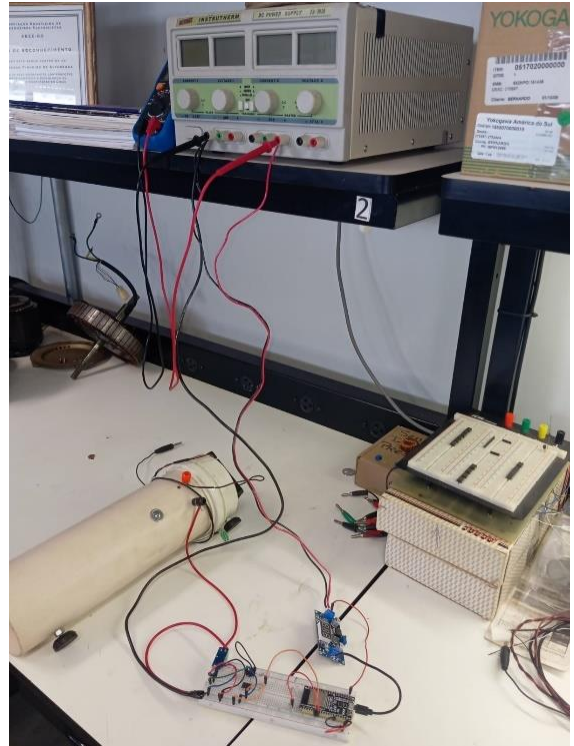


Figura 27: Protótipo do dispositivo na bancada de testes do laboratório de motores elétricos da EMC. Fonte: Autor.

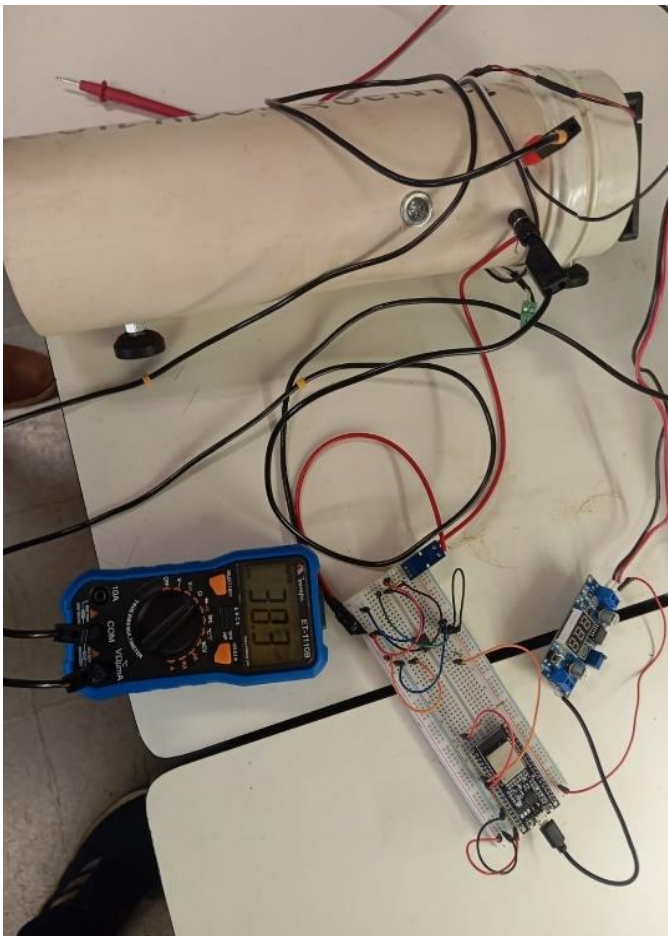


Figura 26: Protótipo do dispositivo na bancada de testes do laboratório de motores elétricos da EMC, com o Multímetro medindo a resistência da carga. Fonte: Autor.



Figura 28: Resultados obtidos no aplicativo móvel na bancada de testes do laboratório de motores elétricos da EMC. Fonte: Autor.

4.2 Validação do Sensor de Tensão

Resultados: A tensão de entrada foi variada em 8 níveis, de 35,1V a 42V, e a tensão reportada pelo ESP32 via telemetria foi registrada. Este procedimento foi realizado duas vezes (Testes 1 e 2) para verificar a repetibilidade das medições, conforme as tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1: Resultados obtidos no primeiro teste de tensão no aplicativo móvel na bancada de testes, Fonte: Autor.

Vout Lido (V)	Vout Teórico (V)	ERRO (%)
44,10	42	5,00%
42,76	41,1	4,04%
41,25	40	3,13%
39,92	38,9	2,62%
38,67	37,9	2,03%
37,64	37	1,73%
36,54	36	1,50%
35,44	35,1	0,97%

Tabela 2: Resultados obtidos no segundo teste de tensão no aplicativo móvel na bancada de testes, Fonte: Autor.

Vout Lido (V)	Vout Teórico (V)	ERRO (%)
44,26	42	5,38%
42,66	41,1	3,80%
41,3	40	3,25%
39,96	39	2,46%
38,82	38	2,16%
37,65	37	1,76%
36,52	36	1,44%
35,58	35,3	0,79%

4.2.1 Análise de Linearidade (Acurácia)

Para analisar a acurácia e linearidade do sistema de medição de tensão, os 16 pontos de dados (combinando Teste 1 e Teste 2) foram plotados em um gráfico de regressão linear, ilustrado na figura 29. O eixo X representa o valor real medido pela fonte de bancada, e o eixo Y representa o valor lido pelo protótipo.

Gráfico 1: Curva de Aferição do Sensor de Tensão

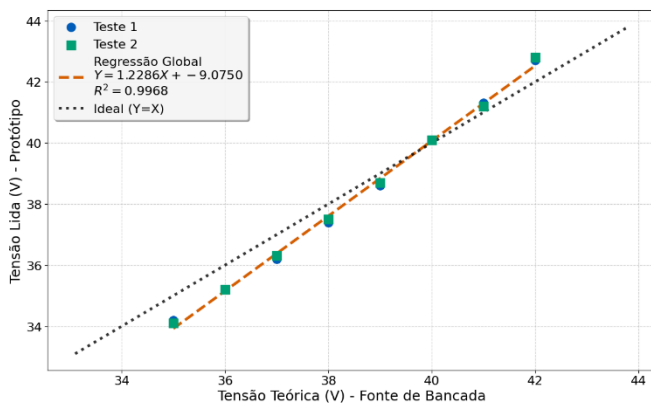


Figura 29: Curva de Aferição do Sensor de Tensão (Testes 1 e 2), Fonte: Autor.

A análise do Gráfico 1 demonstra a alta qualidade da medição. A linha de regressão global, que representa a função de transferência real do sensor, apresenta um comportamento linear em relação à "Linha Ideal (Y=X)". O coeficiente de determinação obtido foi de $R^2 = 0,9968$, indicando um ajuste linear quase perfeito (acima de 99%). A equação da reta obtida experimentalmente.

$$Y = 1,2286X - 9,0750 \quad (3)$$

Esta equação caracteriza o comportamento do divisor de tensão e do ADC do ESP32 e pode ser utilizada futuramente como uma função de calibração de *software* para corrigir as leituras, eliminando o erro sistemático e

aumentando a precisão do sistema para patamares comerciais.

4.2.2 Análise do Comportamento do Erro

Para entender a natureza das discrepâncias encontradas, a figura 30 plota o erro percentual de ambos os testes em função da tensão de entrada, permitindo uma análise detalhada da estabilidade do sensor.

Gráfico 2: Evolução do Erro Percentual

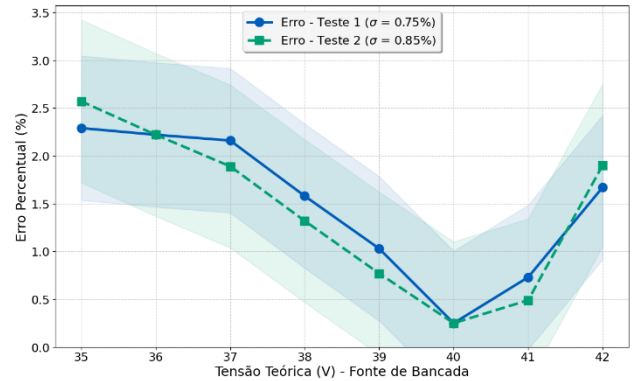


Figura 30: Curva de Erro Percentual Comparativa

A análise do Gráfico 2, em conjunto com o tratamento estatístico dos dados, revela três conclusões fundamentais sobre o protótipo:

1. **Alta Repetibilidade:** As curvas de erro dos Testes 1 e 2 são praticamente sobrepostas. A análise estatística revelou um desvio padrão amostral (σ) de apenas 0,79% para o primeiro teste e 0,87% para o segundo. Esse baixo valor de (σ) comprova que o sistema é estável e previsível, não sofrendo de oscilações aleatórias (ruído branco) significativas.

2. **Tendência do Erro:** Diferente de sensores ideais, observa-se que o erro percentual tende a crescer levemente conforme a tensão diminui (de ~1,6% em 42V para ~2,3% em 35V). Esse comportamento é típico em ADCs de microcontroladores, onde uma tensão de *offset* fixa (o termo linear -9,075 da equação) representa uma fração percentual maior quando o sinal de entrada é menor.

3. **Precisão Aceitável:** Mesmo no pior cenário (35V), o erro máximo permaneceu abaixo de 2,6%. Para fins de monitoramento de uma bateria de e-scooter, onde a decisão de corte ocorre em faixas de tensão largas, essa precisão é mais do que suficiente para garantir a operação segura do veículo.

4.3 Validação do Sensor de Corrente (ACS712)

Resultados: O protótipo foi conectado em série com uma carga resistiva de potência ($38,3\Omega$) e uma fonte DC de laboratório. A corrente no circuito foi variada, ajustando a tensão da fonte para gerar níveis de corrente teóricos entre 0 A e 1,13 A. Os valores lidos pelo ESP32 (após o filtro com LM358 e calibração de ponto zero)

Durante a aquisição de dados, observou-se que o sensor ACS712 apresentou leituras com sinal negativo (ex: -1,35 A para uma carga de 1,0 A). Este comportamento deve-se à orientação da montagem do sensor no protótipo (sentido da corrente fluindo de IP- para IP+), inverso ao previsto na lógica inicial do firmware. Como o objetivo desta etapa é

validar a linearidade e a precisão do transdutor, optou-se por realizar a análise estatística considerando o módulo (valor absoluto) das leituras obtidas nos cinco testes realizados.

Tabela 3: Resultados obtidos no primeiro teste de corrente no aplicativo móvel. Fonte: Autor.

I Lido (A)	I Teórico (A)	ERRO (%)
-0,75	0	N/A
-0,25	0	N/A
-0,7	0	N/A
-0,65	0	N/A
-0,55	0	N/A
-0,5	0	N/A
-0,2	0	N/A
-0,6	0	N/A

Tabela 4: Resultados obtidos no segundo teste de corrente no aplicativo móvel. Fonte: Autor.

I Lido (A)	I Teórico (A)	ERRO (%)
-0,4	0,5	20,00%
-0,2	0,5	60,00%
0	0,5	100,00%
-0,25	0,5	50,00%
-0,25	0,5	50,00%
-0,35	0,5	30,00%
-0,45	0,5	10,00%
-0,35	0,5	30,00%

Tabela 5: Resultados obtidos no terceiro teste de corrente no aplicativo móvel. Fonte: Autor.

I Lido (A)	I Teórico (A)	ERRO (%)
-1,05	0,82	28,05%
-1	0,82	21,95%
-0,9	0,82	9,76%
-0,7	0,82	14,63%
-0,85	0,82	3,66%
-0,95	0,82	15,85%
-0,75	0,82	8,54%
-0,8	0,82	2,44%

Tabela 6: Resultados obtidos no quarto teste de corrente no aplicativo móvel. Fonte: Autor.

I Lido (A)	I Teórico (A)	ERRO (%)
-1,5	1	50,00%
-1,35	1	35,00%
-1,2	1	20,00%
-1,1	1	10,00%
-1,35	1	35,00%
-1,4	1	40,00%
-1,45	1	45,00%
-1,15	1	15,00%

Tabela 7: Resultados obtidos no quinto teste de corrente no aplicativo móvel na bancada de testes, Fonte: Autor.

I Lido (A)	I Teórico (A)	ERRO (%)
-1,15	1,13	1,77%
-1,25	1,13	10,62%
-1,4	1,13	23,89%
-1,5	1,13	32,74%
-1,45	1,13	28,32%
-1,65	1,13	46,02%
-1,35	1,13	19,47%
-1,3	1,13	15,04%

4.3.1 Análise de Linearidade (Acurácia)

Os dados coletados nos cinco ensaios foram processados para extrair a média e o desvio padrão de cada ponto de operação. A curva característica resultante é apresentada na figura 31.

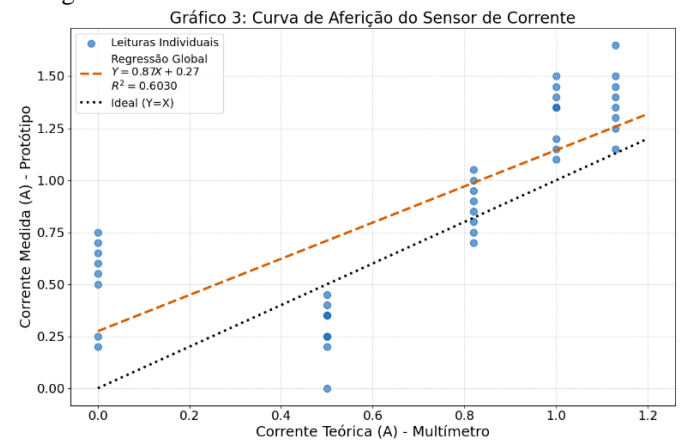


Figura 31: Curva de Aferição do Sensor de Corrente e Regressão Linear. Fonte: Autor.

A análise do Gráfico 3 revela uma correlação linear com coeficiente de determinação $R^2 = 0,6030$. A reta de regressão obtida experimentalmente é descrita pela equação:

$$Y = 0,87X + 0,27 \quad (4)$$

A análise desta equação e da dispersão dos pontos (nuvem azul) permite duas conclusões técnicas importantes:

1. **Offset de Ruído (Termo Independente):** O termo linear de $+0,27$ indica que o sistema possui um "piso de ruído" ou *offset* positivo. Isso significa que, mesmo com correntes muito baixas, o sensor tende a reportar um valor base (devido ao ruído magnético e elétrico do ADC do ESP32).
2. **Sensibilidade em Baixa Escala:** A dispersão visual dos pontos confirma que, na faixa de teste (0 A a 1,13 A), a relação sinal-ruído (SNR) é baixa. Isso é tecnicamente justificável dado o dimensionamento do componente: o sensor ACS712 utilizado possui fundo de escala de 30 A. Os testes foram realizados utilizando menos de 4% da capacidade nominal do sensor, região onde a linearidade é naturalmente comprometida pelo ruído térmico e de quantização.

4.3.2 Análise do Comportamento do Erro

A figura 32 ilustra a evolução do erro percentual médio, com a faixa sombreada representando o desvio padrão (σ) das medidas, indicando a repetibilidade do sensor.

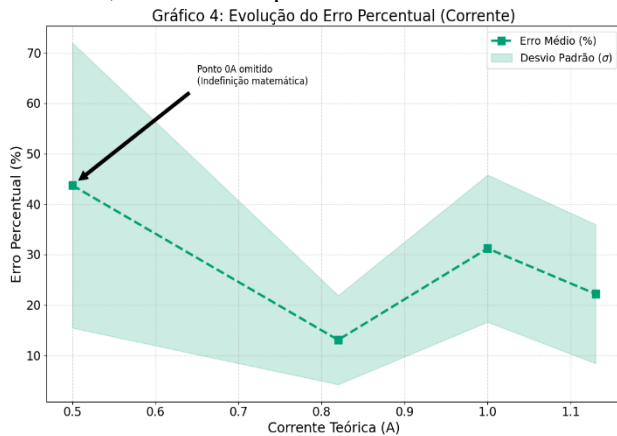


Figura 32: Evolução do Erro Percentual e Desvio Padrão (σ). Fonte: Autor.

A curva descendente apresentada no Gráfico 4 é característica de erros dominados por *offset*.

- Em correntes muito baixas (0,5 A), o erro percentual é elevado (superior a 40%) porque o ruído fixo do sensor tem magnitude comparável ao sinal que se deseja medir.
- Conforme a corrente aumenta (aproximando-se de 1,13 A), o erro percentual cai drasticamente (para a faixa de 20%), pois o sinal útil se torna maior que o ruído de fundo.

A faixa sombreada (verde claro) indica um desvio padrão amostral médio (σ) de aproximadamente $\pm 0,15A$. Este valor representa a incerteza da medição.

Embora a precisão seja limitada para correntes de bancada ($< 1 A$), a projeção da curva de erro indica que o sensor atingirá precisão adequada ($< 5\%$ de erro relativo) quando operar na faixa nominal do motor da e-scooter, onde o *offset* de 0,27 A se tornará desprezível frente à magnitude da corrente total.

4.4 Comportamentos dos indicadores calculados

- **Análise de Potência (P):** O cálculo da potência instantânea ($P = V * I$) demonstrou consistência matemática com as grandezas medidas. As variações observadas na potência refletiram fielmente as oscilações da corrente de carga.
- **Análise de SOC (Estado de Carga):** O comportamento do SOC seguiu o padrão esperado. Iniciando em 100,0% (devido à tensão inicial elevada da fonte), o indicador apresentou um decaimento gradual e linear. Isso valida a eficácia do algoritmo de integração da corrente no tempo para representar o consumo de energia pela carga.
- **Análise de SOH:** Conforme esperado, o SOH alerta o usuário se tiver com Troca de Bateria Recomendada, sendo o resultado direto de o seu sistema ter detectado, através de uma medição elétrica real (a queda de tensão na "arrancada"), que a resistência interna da bateria aumentou, indicando um envelhecimento físico significativo. Isto é, a medição de

tensão valida este resultado, este status está perfeitamente alinhado com a teoria, pois o "Fim da Vida Útil" (EOL) de uma bateria de EV é comumente definido na literatura quando o SOH cai abaixo de 80% [5],[4].

4.5 Análise das Dificuldades de Medição e Ruído

A transição do circuito simulado no *Proteus* [21] para o protótipo físico em *protoboard* revelou desafios significativos na precisão das leituras analógicas. Os testes de bancada iniciais, onde os pinos de entrada deveriam ler 42V e 1A, apresentaram flutuações e valores imprecisos, como visto em logs anteriores na figura 27. Essas imprecisões são atribuídas a três fontes principais de erro:

4.5.1. Erro de *Offset* do ADC do ESP32:

O primeiro grande desafio foi o *offset* de tensão do próprio microcontrolador. O Conversor Analógico-Digital (ADC) do ESP32, mesmo com o pino de entrada fisicamente conectado na fonte de tensão desligada, não retornava uma leitura "crua" de 0. o ADC reportava um valor base de aproximadamente 300-350 (em 4096 níveis), o que equivale a um *offset* de $\sim 0,25V$ no pino. Na função `lerTensao()`, esse pequeno *offset* de $\sim 0,25V$ era então multiplicado pelo ganho do divisor de tensão (aprox. 15.7), resultando em uma leitura "fantasma" de $\sim 3,9V$, mesmo com o pino aterrado. A solução foi implementar a função `calibrarSensorTensao()` no *setup()*, que mede e armazena esse `adcOffsetTensao` e o subtrai de todas as leituras futuras antes de aplicar o cálculo do divisor

4.5.2 Ruído e *Offset* do Sensor de Corrente (ACS712):

O segundo desafio foi o ruído no pino de corrente (GPIO 35). O sensor ACS712 é conhecido por ser suscetível a ruído [14]. Além disso, o regulador chaveado LM2596 [18], que alimenta o sensor, introduz naturalmente ruído de alta frequência (*ripple*) na linha de 5V, o que desestabiliza o ponto zero de 2.5V do ACS712.

A solução foi uma abordagem em duas camadas:

Hardware: A adição do amplificador operacional LM358 [20] como um filtro ativo passa-baixa e buffer, para "limpar" fisicamente o sinal analógico antes da leitura.

Software: A implementação da calibração contínua (`pontoZeroRealNoPino`), que aprende e se adapta a qualquer desvio (*drift*) no ponto zero do sensor.

4.5.3 Erro de Conversão (Ruído de 1 Bit / LSB):

O último desafio é o limite físico da precisão da medição, conhecido como erro de quantização. O ADC do ESP32 tem 12 bits [17], dividindo a tensão de referência de 3.3V em 4096 níveis.

Isso significa que a menor mudança de tensão que o ADC pode detectar (o "erro de 1 bit", ou LSB) é:

$$V_{LSB} = \frac{3,3V}{4095} \approx 0,000805 \text{ (0,805mV)}$$

No pino de corrente, a sensibilidade (após o divisor de 10k/10k) é de 0.033V/A (33mV por Ampere). Uma flutuação de ruído de apenas 1 bit (0.805mV) no ADC se traduz em um "ruído de corrente" de:

$$I_{ruído} = \frac{0,000805V}{0,033V/A} \approx 0,024A \text{ (24 mA)}$$

Isso prova que é fisicamente impossível para o sistema ter uma leitura de 0.000A. Sempre haverá uma flutuação mínima de $\pm 0,024A$. Esta análise justifica a

implementação da "zona morta" de *software* (if (abs(corrente) < 0.2)), que ignora essas flutuações de baixo nível e força a corrente para 0.00A quando o sistema está em repouso, garantindo que o SOC (pela Contagem de Coulomb) [5] não sofra *drift* (acúmulo de erro) enquanto o motor está desligado.

4.6 Conclusão dos Testes: Os testes em laboratório validaram com sucesso o design do protótipo. A combinação de *hardware* (filtros, divisores) e *software* (calibração de *offset* e ponto zero) provou ser eficaz para corrigir os problemas de ruído e *offset* encontrados no mundo real, que não são evidentes em simulação [15]. O sistema demonstrou ser capaz de medir com precisão os parâmetros vitais da bateria corrente e tensão, calculando os outros parâmetros objetivos do dispositivo e transmiti-los via telemetria, atendendo a todos os objetivos propostos.

V. Conclusão

5.1 Conclusão do projeto

Este Trabalho de Conclusão de Curso propôs solucionar um desafio central da micromobilidade elétrica: a ausência de um monitoramento preciso e acessível do estado da bateria em e-scooters. Conforme estabelecido na introdução, a degradação prematura e a incerteza sobre a autonomia real representam barreiras significativas para a confiabilidade e sustentabilidade desses veículos [4], [8].

O objetivo principal foi atingido com o desenvolvimento de um protótipo de telemetria de baixo custo, baseado no microcontrolador ESP32. O dispositivo mostrou-se capaz de estimar em tempo real o Estado de Carga (SOC) e o Estado de Saúde (SOH) da bateria.

A metodologia de engenharia aplicada mostrou-se robusta. A etapa inicial de modelagem virtual no *software Proteus* permitiu a validação lógica dos algoritmos fundamentais, como a Contagem de Coulomb [5] e o método de detecção de transientes de partida (popularmente conhecido como "arrancada") para o cálculo do SOH [7], em um ambiente seguro e controlado [21].

A transição para o protótipo físico revelou desafios práticos não evidentes na simulação, como o ruído elétrico no sensor ACS712 [14] e o *offset* de tensão no ADC do ESP32 [15]. Estes problemas foram solucionados com sucesso através de uma abordagem híbrida:

- **Hardware:** Implementação de um circuito de condicionamento de sinal com filtro ativo passa-baixa, utilizando o amplificador operacional LM358, e divisores de tensão para a correta adaptação de níveis lógicos.
- **Software:** Desenvolvimento de rotinas de calibração automática no *setup* do *firmware*. Essas rotinas medem e compensam ativamente os erros de *offset* e o ponto zero da corrente, além de aplicarem filtros digitais para estabilização das leituras.

Os testes de carga controlada em bancada validaram a eficácia desta abordagem. O sistema demonstrou capacidade de estabilizar a leitura de corrente próximo de 0,00A durante o repouso e de medir com precisão os

valores de tensão e corrente sob carga. A telemetria via Bluetooth para o aplicativo móvel também se mostrou funcional e estável.

Conclui-se que o protótipo desenvolvido é funcional, preciso dentro das limitações dos sensores de baixo custo e viável economicamente. O sistema entrega ao usuário dados superiores aos de um voltímetro comum, oferecendo uma estimativa de autonomia real e um indicador vital de envelhecimento da bateria.

5.2 Impactos e Contribuições do Trabalho

O dispositivo desenvolvido, embora seja um protótipo, apresenta um potencial de impacto significativo para a sociedade e para o mercado de micromobilidade:

5.2.1 Para o Usuário (Consumidor)

O impacto mais direto é o **aumento da confiabilidade e segurança**. O usuário deixa de depender de um indicador de carga impreciso e passa a ter dados reais de SOC, reduzindo a "ansiedade de autonomia". Mais importante, o monitoramento do SOH (ex: "Troca Recomendada") alerta o usuário sobre uma bateria envelhecida e potencialmente perigosa (risco de falha ou fuga térmica), incentivando a manutenção preditiva.

5.2.2 Para Empresas

Para empresas que gerenciam centenas de e-scooters, este sistema oferece uma ferramenta poderosa de gestão de ativos. Em vez de trocar baterias com base em tempo de uso, a telemetria do SOH permite a substituição baseada na condição real. Isso otimiza a logística, reduz custos operacionais e maximiza a vida útil de cada bateria.

5.2.3 Impacto Ambiental e de Sustentabilidade

Ao fornecer dados precisos de SOH, o sistema combate o descarte prematuro de baterias. O monitoramento preciso é o primeiro passo para habilitar essa economia circular, reduzindo o lixo eletrônico e o impacto ambiental da extração de lítio.

5.3 Trabalhos Futuros: Este TCC estabelece uma base robusta para futuras pesquisas e aprimoramentos. Como próximo passo, recomenda-se:

- 1. Integração de um Sensor de Temperatura:** Adicionar um sensor de temperatura fixado à bateria. Esta é a melhoria de maior impacto, pois permitiria ao *software* compensar os cálculos de SOH e SOC, visto que a resistência interna e a capacidade são altamente dependentes da temperatura [4],[7].
- 2. Validação em Campo:** Realizar testes de longa duração na e-scooter real, em diferentes condições de uso, para validar a precisão da Contagem de Coulomb e do SOH ao longo de múltiplos ciclos de carga e descarga.
- 3. Aprimoramento da Interface:** Desenvolver um aplicativo móvel dedicado com uma interface gráfica mais amigável, incluindo medidores e gráficos históricos.
- 4. Logging de Dados na Nuvem:** Utilizar a capacidade Wi-Fi do ESP32 para enviar os dados de telemetria para um banco de dados na nuvem permitindo a análise de dados de longo prazo.

V. Referências

- [1] CARDOSO, Leandro. Transporte público, acessibilidade urbana e desigualdades socioespaciais na região metropolitana de Belo Horizonte. 2007. Tese (Doutorado em Demografia) – Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MPBB-7A2N6A/1/tese_leandro_cardoso_2007.pdf. Acesso em: 4 nov. 2025.
- [2] URES, Carolina et al. ESTUDO DE SCOOTERS ELÉTRICAS: mercados, casos e análises. Brasília, DF: Ministério da Economia; GIZ, 2020. Disponível em: <https://pnme.org.br/biblioteca/estudo-de-scooters-eletricas-mercados-casos-e-analises/>. Acesso em: 3 set. 2025.
- [3] ROIG-COSTA, Oriol et al. La movilidad post-pandemia: perfiles y usos de la micromovilidad en Barcelona. *Revista Transporte y Territorio*, n. 25, p. 72-96, jul./dez. 2021. Disponível em: <https://ddd.uab.cat/record/257863>. Acesso em: 25 out. 2025.
- [4] DAOUD, A.; REHMAN, H.; ROMDHANE, L.; MUKHOPADHYAY, S. SOC and Temperature Aware Battery Swapping for an E-Scooter Using a Robotic Arm. *Robotics*, v. 14, n. 1, art. 21, 2025. DOI: 10.3390/robotics14020021. Acesso em: 4 set. 2025.
- [5] SANTOS, Patrick Cadier D’Aquino e Baroni. Métodos para a estimativa da capacidade de baterias estacionárias com ênfase em aplicações de segurança: Versão Corrigida. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-05032021-091755/publico/PatrickCadierDAquinoeBaroniSantosCorr21.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2025.
- [6] SENTHILKUMAR, M. et al. Efficient Battery Monitoring System for E-Vehicles. In: 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTING & COMMUNICATION SYSTEMS (ICACCS), 2021, Coimbatore, India. Anais... Coimbatore: IEEE, 2021. p. 833-836. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9442038>. DOI: 10.1109/ICACCS51430.2021.9442038. Acesso em: 30 set. 2025.
- [7] SHEN, Wei et al. Heat generation and degradation mechanism of lithium-ion batteries during high-temperature aging. *ACS Omega*, v. 7, n. 49, p. 44733-44742, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c04093>. Acesso em: 15 set. 2025.
- [8] ASFANI, D. A. et al. Real-time battery monitoring and fault identification application on electric scooter. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON APPLICATION FOR TECHNOLOGY OF INFORMATION AND COMMUNICATION (ISEMANTIC), 2019, Surabaya, Indonesia. Anais... Surabaya: IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8884324>. Acesso em: 04 nov. 2025.
- [9] REDDY, T. B. (Ed.). *Linden's Handbook of Batteries*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2011. Disponível em: <https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheae-works/31e81714f2ef35b8/18612c103589dd483a7998835a510d00c04a47cd69e7c232c8724c0df672a86f/book-summary.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2025.
- [10] RAHMAN, Tuhibur; ALHARBI, Talal. Exploring Lithium-Ion Battery Degradation: A Concise Review of Critical Factors, Impacts, Data-Driven Degradation Estimation Techniques, and Sustainable Directions for Energy Storage Systems. *Batteries*, v. 10, n. 7, p. 220, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/7/220>. Acesso em: 05 nov. 2025.
- [11] BARBAR, Jamil Salem. Divisores de Tensão – Introdução para MS e Microcontroladores. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), [2025]. Disponível em: https://www.facom.ufu.br/~jamil/eletronica/divisores_tensao/divisores_tensao.htm. Acesso em: 3 set. 2025.
- [12] SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. *Microeletrônica*. 5. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2007.
- [13] BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. 5. ed. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil, 1994.
- [14] ALLEGRO MICROSYSTEMS. ACS712: Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. [Datasheet]. Worcester, MA: Allegro MicroSystems, Inc., 2006.
- [15] ROVERE, Rodrigo Lisboa Della. Protótipo de um Sistema Inteligente de Monitoramento do Consumo de Energia Elétrica de uma Residência. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/b3b378a1-7781-425a-800f-71d114f48f1f/Rovere_Rodrigo_Lisboa_Della_tcc.pdf. Acesso em: 15 out. 2025.
- [16] ESPRESSIF SYSTEMS. Get Started with ESP32-DevKitC. [S.l.]: Espressif Systems, [s.d.]. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>. Acesso em: 8 out. 2025.
- [17] ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32-WROOM-32 Datasheet. Xangai: Espressif Systems, [s.d.]. Disponível em:

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentati on/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 7 out. 2025.

[18] ON SEMICONDUCTOR. LM2596: 3.0 A, Step-Down Switching Regulator. [Datasheet]. Rev. 1. ON Semiconductor. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/2032213/ONSEMI/LM2596.html>. Acesso em: 8 out. 2025.

[19] PERTENCE JR, Antônio. Amplificadores operacionais e filtros ativos. 8. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda., 2014.

[20] ON SEMICONDUCTOR. LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V: Single Supply Dual Operational Amplifiers. Rev. 26. ON Semiconductor. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/514875/ONSEMI/LM358.html>. Acesso em: 8 out. 2025.

[21] LABCENTER ELECTRONICS. Why VSM – Virtual System Modelling. Wetherby, UK: Labcenter Electronics Ltd., [2025]. Disponível em: <https://www.labcenter.com/whyvsm/>. Acesso em: 4 nov. 2025.

[22] PATTON, Evan W.; TISSENBAUM, Michael; HARUNANI, Farzeen. MIT App Inventor: Objectives, Design, and Development. In: KONG, S.-C.; ABELSON, H. (Eds.). Computational Thinking Education. Cingapura: Springer, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6528-7_3. Acesso em: 8 out. 2025.