

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

RODRIGO KAZUO MORISHIGUE KAWAKAMI

Desenvolvimento de uma estação meteorológica e uma ferramenta de cálculo de
consumo energético de sistemas de sensoriamento voltados para aplicações na
medicina veterinária

São Carlos
2025

RODRIGO KAZUO MORISHIGUE KAWAKAMI

Desenvolvimento de uma estação meteorológica e uma ferramenta de cálculo de consumo energético de sistemas de sensoriamento voltados para aplicações na medicina veterinária

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Vieira Ventura

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

K22d	<p>KAWAKAMI, RODRIGO KAZUO MORISHIGUE</p> <p>Desenvolvimento de uma estação meteorológica e uma ferramenta de cálculo de consumo energético de sistemas de sensoriamento voltados para aplicações na medicina veterinária / RODRIGO KAZUO MORISHIGUE KAWAKAMI; orientador Ricardo Vieira Ventura. São Carlos, 2025.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2025.</p> <p>1. Estação Meteorológica. 2. Consumo Energético. 3. Engenharia. 4. Medicina Veterinária. I. Título.</p>
------	--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Rodrigo Kazuo Morishigue Kawakami

Título: “Estudo e aplicação de sistemas eletrônicos voltados para o auxílio de sensoriamento na medicina veterinária”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em
16/06/2025,**

com NOTA 9,0 (nove,zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Ricardo Vieira Ventura - FMVZ/USP

Prof. Dr. Pedro de Oliveira Conceição Junior - SEL/EESC/USP

Mestre Diógenes Lodi Pinto - FMVZ/USP

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior**

*Este trabalho é dedicado à minha família, que
esteve ao meu lado e me inspirou a ser melhor.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, que sempre esteve comigo na minha jornada acadêmica, me apoiando, ouvindo e ajudando em todas as etapas da minha formação;

Ao meu orientador, professor Dr. Ricardo Vieira Ventura por partilhar seus conhecimentos comigo, orientar o meu TCC e pela grande amizade;

Aos meus amigos da universidade Tsuyoshi Sonobe, Ana Luísa Rafael Maia, Fernanda Junqueira Fortes Cardoso e Polick Chen Zhanpeng pela amizade e por compartilhar muitos momentos bons comigo ao longo da nossa jornada na USP;

À minha namorada Livia Lissa Kobayashi pelo apoio e suporte ao longo da minha jornada;

Aos meus colegas e amigos, que me apoiaram em momentos difíceis, sejam acadêmicos ou pessoais, em especial os meus amigos do BIOMA-Tech: Diógenes, Paula, Aline, Alana, Bruno, Lucas e Natália.

Ao suporte financeiro do Programa Unificado de Bolsas da Universidade de São Paulo, unidade FMVZ com o projeto de título: Estimação da massa de forragem por meio de imagens aéreas capturadas via drone, de 2022 (KAWAKAMI, 2023);

Aos meus professores da Universidade que me ensinaram com muita paciência e dedicação, em especial ao professor Doutor José Carlos Melo Vieira Júnior pelas excelentes aulas e ensinamentos e ao professor Doutor Pedro Oliveira pelas aulas extremamente proveitosas e dinâmicas.

À Universidade de São Paulo pela infraestrutura e apoio disponibilizados nos meus anos de graduação.

“A melhor forma de prever o futuro é criá-lo”

(Peter F. Drucker)

RESUMO

KAWAKAMI, R. K. M. **Desenvolvimento de uma estação meteorológica e uma ferramenta de cálculo de consumo energético de sistemas de sensoriamento voltados para aplicações na medicina veterinária.** 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

Como a produção de alimentos deve aumentar nos próximos anos, é desejável uma melhora na eficiência na produção animal, que pode ser alcançada com o uso de dados meteorológicos, esses dados podem ser coletados com sensores. O Power NASA é uma plataforma *online* de dados meteorológicos e para a validação da mesma, foi proposto o desenvolvimento de uma estação meteorológica durante qual foram levantadas dificuldades técnicas no desenvolvimento de circuitos eletrônicos com baterias encontrados por integrantes do BIOMA-Tech, assim este trabalho apresenta dois sistemas: a estação meteorológica e uma calculadora de estimativa de consumo de sistemas eletrônicos. O primeiro sistema consistiu no desenvolvimento de uma estação meteorológica capaz de coletar dados de temperatura, umidade do solo e do ar, além de possuir detecção de cobertura de chuva. Para o segundo sistema, foram feitas duas aplicações: uma ferramenta de cálculo para a estimativa de consumo de sistemas eletrônicos e capacidade de baterias e um circuito de validação para a ferramenta de cálculo, tendo como base o Arduino nano e um sensor de corrente contínua. A primeira aplicação da calculadora tem como principais usuários pesquisadores da área de medicina veterinária. A ferramenta utiliza valores de tensão, corrente, eficiência e ciclo de trabalho dos componentes utilizados, assim como a idade da bateria e condições ambientais para a realização dos cálculos de consumo de energia elétrica. A segunda aplicação da calculadora coleta dados de corrente de circuitos de teste e estima o consumo médio de energia deles. Os resultados obtidos pelo teste final da estação meteorológica apresentou valores de correlação altos ou moderados, validando a plataforma Power NASA. Os resultados dos testes da segunda aplicação da calculadora, quando comparados com as simulações da primeira, apresentaram diferenças dentro da margem de erro esperada, demonstrando a confiabilidade do sistema. Com os resultados obtidos, espera-se no futuro, que aplicações da engenharia possam auxiliar em projetos na área da medicina veterinária.

Palavras-chave: Estação Meteorológica, Consumo energético, Engenharia, Medicina Veterinária.

ABSTRACT

KAWAKAMI, R. K. M. **Development of a meteorological station and a tool for calculating the energy consumption of sensing systems aimed at applications in veterinary medicine.** 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

As food production is expected to increase in the next few years, improving efficiency in animal production becomes desirable, which can be achieved with the use of meteorological data. This data can be collected using sensors. Power NASA is an online meteorological data platform, and for its validation, the development of a weather station was proposed. During this development, technical difficulties were identified in the design of battery-powered electronic circuits by members of BIOMA-Tech. Therefore, this work presents two systems: the weather station and a calculator for estimating the consumption of electronic systems. The first system consisted of developing a weather station capable of collecting data on temperature, soil humidity, and air humidity, as well as detecting rain coverage. As for the second system, two applications were developed: a calculation tool developed to estimate the consumption of electronic systems and battery capacity, and a validation circuit for the calculation tool, based on the Arduino Nano and a direct current sensor. The main users of the calculator's first application are researchers in the field of veterinary medicine. The tool uses voltage, current, efficiency, and duty cycle values of the components used, as well as battery age and environmental conditions, to perform energy consumption calculations. The second application of the calculator collects current data from test circuits and estimates their average energy consumption. The final test results of the weather station showed high and moderate correlation values, validating the Power NASA platform. The test results from the second application of the calculator, when compared to the simulations from the first, showed differences within the expected margin of error, demonstrating the system's reliability. Based on the results obtained, it is expected that, in the future, engineering applications may contribute to projects in the field of veterinary medicine.

Keywords: Meteorological Station, Energy Consumption, Engineering, Veterinary Medicine

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de blocos do projeto piloto.....	37
Figura 2: Montagem física do armazenamento de dados do protótipo.....	37
Figura 3: Montagem física do sistema de alimentação do protótipo.....	38
Figura 4: Montagem parcial do protótipo.....	39
Figura 5: Esquemático do projeto piloto utilizado nos testes.....	40
Figura 6: Gráfico de coleta de dados meteorológicos com o projeto piloto.....	41
Figura 7: Gráfico dos dados meteorológicos do Power NASA.....	41
Figura 8: Diagrama de blocos da ferramenta.....	47
Figura 9: Esquemático do circuito de medição para verificação.....	51
Figura 10: Esquemático do circuito de teste de bateria.....	54
Figura 11: Montagem física do circuito de teste de bateria.....	54
Figura 12: Esquemático do teste com LEDs.....	55
Figura 13: Montagem física do teste com LEDs.....	56
Figura 14: Esquemático do teste com acelerômetro.....	57
Figura 15: Montagem física do teste com acelerômetro.....	57
Figura 16: Esquemático do teste com motor CC.....	58
Figura 17: Montagem física do teste com motor CC.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista de materiais do projeto piloto.....	35
Tabela 2: Componentes dos testes práticos.....	52
Tabela 3: Resultado do valor de capacidade de bateria do teste 1.....	61
Tabela 4: Resultados da média de corrente dos testes.....	61
Tabela 5: Valores de entrada da simulação do Teste 1.....	70
Tabela 6: Valores de saída da simulação do Teste 1.....	71
Tabela 7: Valores de entrada da simulação do Teste 2.....	71
Tabela 8: Valores de saída da simulação do Teste 2.....	71
Tabela 9: Valores de entrada da simulação do Teste 3.....	72
Tabela 10: Valores de saída da simulação do Teste 3.....	72
Tabela 11: Valores de entrada da simulação do Teste 4.....	72
Tabela 12: Valores de saída da simulação do Teste 4.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIOMA	Laboratório de Bioinformática e Melhoramento Animal
CC	Corrente Contínua
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FMVZ	Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia
GPS	<i>Global Positioning System</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i>
PUB	Programa Unificado de Bolsas
SD	<i>Secure Digital</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
°C	Graus Celsius
m	Mili
Ω	Ohm
k	Quilo
R\$	Real Brasileiro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	29
1.1 Contextualização.....	29
1.2 Objetivos gerais.....	31
1.3 Objetivos específicos.....	31
2 PROJETO PILOTO.....	33
2.1 Arquitetura do sistema.....	33
2.1.1 Aquisição e armazenamento de dados.....	33
2.1.2 Sistema de alimentação.....	34
2.1.3 Lista de materiais.....	35
2.2 Metodologia de implementação.....	36
2.3 Resultados e Discussão.....	41
3 CALCULADORA.....	42
3.1 Metodologia.....	43
3.2 Implementação.....	43
3.2.1 Cálculos da ferramenta.....	43
3.2.2 Funcionamento da Ferramenta.....	47
3.3 Estrutura de Testes e Aplicações Propostas.....	49
3.3.1 Sistema de medição.....	49
3.3.2 Descrição dos testes.....	51
3.4 Entradas e Saídas da simulação.....	59
3.5 Resultados e Discussões dos Testes.....	60
4 CONCLUSÃO.....	64
REFERÊNCIAS.....	66
APÊNDICE A - Tabelas com valores de entrada e saída dos testes da calculadora.....	69

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da população mundial, que deve atingir 10 bilhões de pessoas até 2050, a produção de alimentos deve acompanhar esse crescimento, com uma estimativa de aumento de 56% em comparação com 2010 (RANGANATHAN, 2018). Nota-se que o desenvolvimento nessa área é relevante e benéfico para o futuro.

Nesse contexto, melhorias na produção de alimentos são desejadas, como, por exemplo, fazer o uso de dados meteorológicos para analisar áreas com propensão a ter temperaturas elevadas que podem causar estresse térmico em animais (WANG, ZHONG e ZHOU, 2020), mas, é necessário considerar a influência de fatores internos às instalações, os quais podem ocasionar variações nos níveis de temperatura e umidade (SCHOCK, et al., 2016), melhorar a eficiência da rotação de piquetes para pastagem de gado, que pode ser adquirida com a predição do crescimento de plantas, influenciados por valores de temperatura, umidade do solo e precipitação (MARWA; OTHMAN; SAKLI, 2020), outras melhorias podem ser descritas com o crescimento de animais.

A adoção de tecnologias de sensoriamento na agropecuária é benéfica para fazendeiros, principalmente pela menor necessidade de contratação de pessoas para o monitoramento de animais (NEETHIRAJAN, 2020). O uso de sensores pode ser aplicado em diversas áreas da Medicina Veterinária, tais como o estudo de sons, vibrações e do peso de uma colméia em um ambiente hostil na apicultura (ANWAR et al., 2022), o uso de GPS para a detecção da movimentação de animais (BRENNAN et al., 2021), ou até mesmo a análise de eventos relacionados à excreção em vacas leiteiras (WILLIAMS, 2022).

Dentre as soluções de coleta de dados meteorológicos, destaca-se o Power NASA, plataforma contendo dados, de qualquer local do planeta, disponibilizados de forma gratuita, desenvolvida pela empresa *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), foi projetada para utilizar diversos sistemas de satélites para a aquisição e análise dos dados (STACKHOUSE, s.d.).

Existem diversas estações meteorológicas disponíveis no mercado, porém com custo elevado, em que algumas podem apresentar acesso restrito aos dados (MLA, 2013). Portanto, foi desenvolvido um sistema próprio de monitoramento meteorológico local, que permitisse confrontar os dados adquiridos, com componentes de baixo custo integrados a um microcontrolador, aos valores disponíveis na plataforma Power NASA. O objetivo desse sistema é operar de forma autônoma, com o armazenamento dos dados feitos em um cartão SD, além de alimentação por baterias de lítio-íon e carregamento via placas fotovoltaicas.

Considerando um sistema alimentado por baterias, deve-se levar em consideração que elas têm a sua capacidade de armazenamento de energia elétrica reduzida ao longo do tempo, numa função não linear de parâmetros técnicos e ambientais (MORING e MATHIEU, 2022), o que deve ser levado em conta na projeção de um sistema alimentado por baterias. A temperatura do ambiente em que as baterias são armazenadas influencia no seu armazenamento de energia elétrica total (BATTERY UNIVERSITY, 2021), assim como a taxa de descarga.

O projeto também visa facilitar o cálculo de consumo energético e estimativa de capacidade de baterias por meio de uma calculadora, visto que, apesar de existirem ferramentas *online* para este tipo de cálculo junto com a bateria, tais como vistas em (NEUTERT, 2016) e (SMITH, 2022), suas funções são específicas para certas aplicações em ambos os casos, com a baixa capacidade de inserir novos parâmetros e de manipular os dados da forma desejada pelo autor.

1.1 Contextualização

O Laboratório de Bioinformática e Melhoramento Animal (BIOMA-Tech) é um grupo de pesquisa vinculado à Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ) da Universidade de São Paulo (USP), localizado no campus Fernando Costa, em Pirassununga. Tem como principal linha de pesquisa a análise de dados genômicos e fenotipagem digital de animais de produção. Mais recentemente, passou a investigar a influência de fatores ambientais sobre as mesmas características fenotípicas. Diante dessa nova linha de pesquisa, o acesso a dados de monitoramento ambiental torna-se imprescindível.

Foi identificado um banco de dados meteorológicos de livre acesso, chamado Power NASA, cuja acurácia ainda não havia sido verificada pelo laboratório. Portanto, tornou-se pertinente estudar essa questão envolvendo dados capturados por meio de sistemas eletrônicos de monitoramento ambiental, demandando a atuação de um estudante com perfil técnico na área.

Assim, em 2023, o autor foi convidado a integrar o BIOMA-Tech pelo professor doutor Ricardo Vieira Ventura para desenvolver um sistema de validação do Power NASA na forma de uma estação meteorológica. O projeto foi financiado pelo Programa Unificado de Bolsas (PUB) da USP, identificado através do N° 3600.

No momento do convite, o BIOMA-Tech ainda não contava com estudantes da área de engenharia elétrica, o que possibilitou, além do desenvolvimento da estação meteorológica, a

inclusão de alguém com perfil técnico para atuar em parceria em projetos que exigissem conhecimentos de eletrônica, automação e sistemas de energia.

O principal projeto desenvolvido, como colaborador em sua primeira versão, além da estação, foi uma balança eletrônica para pesagem de bezerros em ambientes rurais, projetada para operar de forma *off-grid*, isto é, sem depender da rede elétrica. Foram utilizados painéis fotovoltaicos e baterias recarregáveis, garantindo a autonomia energética do equipamento durante o seu período de funcionamento. Nesse momento, o autor auxiliou o pesquisador responsável na definição dos materiais necessários para o desafio, considerando que não havia uma estimativa prévia de consumo energético nem o dimensionamento do sistema de alimentação, já que o consumo era inconstante e as condições climáticas do local imprevisíveis, o sistema foi superdimensionado para o funcionamento ininterrupto da balança.

Retornando ao primeiro protótipo da estação meteorológica, evidenciou-se uma dificuldade em estimar o consumo energético real da mini estação, especialmente quando sua alimentação estava subdimensionada. O projeto da balança encontrou esse problema de outra forma, a sua alimentação energética foi superdimensionada, o que fez com que não houvesse nenhum problema nesse quesito no período de funcionamento do projeto. Porém, quando os usuários da balança questionaram o tempo de vida do sistema sem o carregamento feito por uma placa fotovoltaica, não foi possível fornecer tal estimativa, já que tais cálculos não tinham sido realizados e, naquele momento, não havia uma ferramenta capaz de tal execução.

Tais dificuldades recorrentes, observadas devido à complexidade da análise de baterias, que possuem diversos parâmetros não explorados completamente anteriormente, levaram à elaboração da segunda etapa deste trabalho, descrita no capítulo referente à calculadora.

1.2 Objetivos gerais

Validar os dados climáticos disponíveis na plataforma Power NASA e desenvolver uma ferramenta de cálculo do consumo de aplicações eletrônicas de pequeno porte, voltadas à agropecuária e à pesquisa científica em campo, suprimindo as necessidades de cálculo e dimensionamento desses sistemas.

1.3 Objetivos específicos

Para a validação dos dados climáticos, desenvolver uma estação meteorológica autônoma para a coleta de dados ambientais com foco na comparação e validação de dados adquiridos localmente em relação aos fornecidos pelo Power NASA, visando verificar a confiabilidade dos dados provindos da plataforma web. Como objetivo secundário o desenvolvimento de um sistema de alimentação com duração indeterminada.

Para a ferramenta de cálculo de consumo, desenvolver um script para a estimativa do consumo energético de sistemas eletrônicos embarcados para usuários com pouco conhecimento técnico na área. Como objetivo secundário o auxílio do dimensionamento de baterias e painéis solares, permitindo a estimativa do tempo de funcionamento desses sistemas eletrônicos.

2 PROJETO PILOTO

2.1 Arquitetura do sistema

A arquitetura do projeto foi dividida em dois sistemas: a aquisição de dados e carregamento automático de baterias via placas fotovoltaicas, visando a sua implementação em qualquer local, mesmo sem a presença da rede elétrica.

2.1.1 Aquisição e armazenamento de dados

A aquisição de dados contou como principal componente físico com o Arduino nano, microcontrolador capaz de realizar a leitura, o processamento e o envio de sinais vindos de sensores analógicos e digitais, bem como o controle de atuadores selecionado pela sua fácil utilização, ampla documentação *online*, custo reduzido e baixo consumo de energia elétrica. Como a parte fundamental do projeto era a coleta de dados meteorológicos, na fase de planejamento priorizam-se os seguintes parâmetros:

- Temperatura
- Umidade relativa do ar
- Umidade do solo
- Presença de chuva

Note que há outros parâmetros que poderiam ter sido coletados em conjunto com os descritos, tais como a incidência de luz solar e velocidade do vento. No entanto, por limitações de orçamento, decidiu-se que os quatro parâmetros selecionados teriam impacto suficiente em relação ao custo de seus sensores e à complexidade de implementação deles.

Para o armazenamento de dados, foi utilizada uma solução local, de forma que a coleta e a análise fossem realizadas posteriormente, simplificando o projeto como um todo, dado que a transmissão dos dados junto à coleta seria custosa e complexa, não abrangendo o escopo do projeto. Para tal, foi utilizado um módulo cartão SD de 1 GB para o Arduino nano suficiente para armazenar dados coletados a cada 10 segundos, durante 24 horas por dia ao longo de dois anos, uma vez que adotou-se a utilização de arquivos .txt de consumo estimado em 100 B por mensagem.

2.1.2 Sistema de alimentação

A mini estação não tem como principal característica a extrema portabilidade do sistema, porém considerando que, em outros projetos do BIOMA-Tech e em desenvolvimentos futuros, tal propriedade é de grande relevância, foram utilizadas baterias de alta densidade energética para a alimentação do sistema com o intuito de promover o aprimoramento do conhecimento desse tipo de bateria. Apesar de não ser essencial, o uso de baterias com maior densidade energética auxilia no transporte da estação como um todo. Para que a estação seja totalmente *off-grid*, e como ela permanecerá sob constante exposição solar, foram utilizadas placas fotovoltaicas para o seu carregamento.

2.1.3 Lista de materiais

Os materiais escolhidos para o projeto estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Lista de materiais do projeto piloto

Componente	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço total (R\$)	Descrição
Arduino nano	1	30	30	Microcontrolador utilizado
Bateria de Lítio-Ion de 3800 mAh	2	23	46	Baterias para alimentação dos sistema
Cartão SD 1GB	1	10	10	Cartão SD para armazenar os dados coletados
Chave retentiva Switch	1	4	4	Chave liga/desliga do sistema
Conversor CC-CC	1	7	7	Conversor CC-CC para conversão de tensão das baterias para o circuito
Fios de ligação	1	3	3	Fios utilizados para ligações entre partes do circuito
Fios de teste Jumper	1	5	5	Fios utilizados para ligações entre componentes
Módulo Arduino sensor de chuva	1	5	5	Sensor de chuva
Módulo Arduino Sensor de Umidade do solo	1	8	8	Sensor de umidade do solo
Módulo de carregamento TP4056	1	6	6	Módulo de carregamento das baterias pela placa solar
Módulo de Cartão SD	1	8	8	Módulo de cartão SD para auxiliar no registro de dados
Módulo de tempo: Real Time Clock RTC DS3231	1	8	8	Módulo de tempo para o auxílio do registro dos dados
Placa de acrílico	1	8	8	Placa de acrílico transparente para facilitar a visualização dos sistema
Placa fotovoltaica de 1,5 W	4	26	104	Placas fotovoltaicas para carregamento do sistema
Placa padrão	1	7	7	Placa para montar os componentes
Placas de testes Protoboard	1	16	16	Placa de testes para o protótipo
Recipiente plástico	1	2	2	Recipiente impermeável para armazenar o sistema
Sensor de Temperatura DHT11	1	10	10	Sensor de temperatura
Soquete de solda Macho-Fêmea	1	1	1	Soquete para auxiliar na montagem dos componentes na placa padrão
Total	23	187	288	-

Fonte: Própria, 2025

Note que os valores da Tabela 1 são referentes a maio de 2025, totalizando um valor de R\$ 288,00. No entanto, no ano de realização do projeto, 2023, o projeto teve um custo de aproximadamente R\$ 250,00, atendendo ao requisito de ser um projeto de baixo custo, dado

que estações meteorológicas comerciais podem atingir o valor de R\$ 1000,00, e os dados coletados não têm acesso facilitado, como ocorre em um projeto desenvolvido no laboratório.

2.2 Metodologia de implementação

Para implementar o projeto, adotou-se a divisão em três partes físicas: a parte externa, o armazenamento de dados e o conjunto de bateria. A parte externa é responsável pela coleta de dados no ambiente, propositalmente exposta aos elementos, assim como o carregamento via luz solar. O armazenamento dos dados incluiu o microcontrolador, o módulo Arduino de Cartão SD e os periféricos necessários para o seu funcionamento. O conjunto de alimentação consistiu no uso da bateria e do módulo de carregamento, ambos internos, não expostos ao clima devido à maior sensibilidade à água.

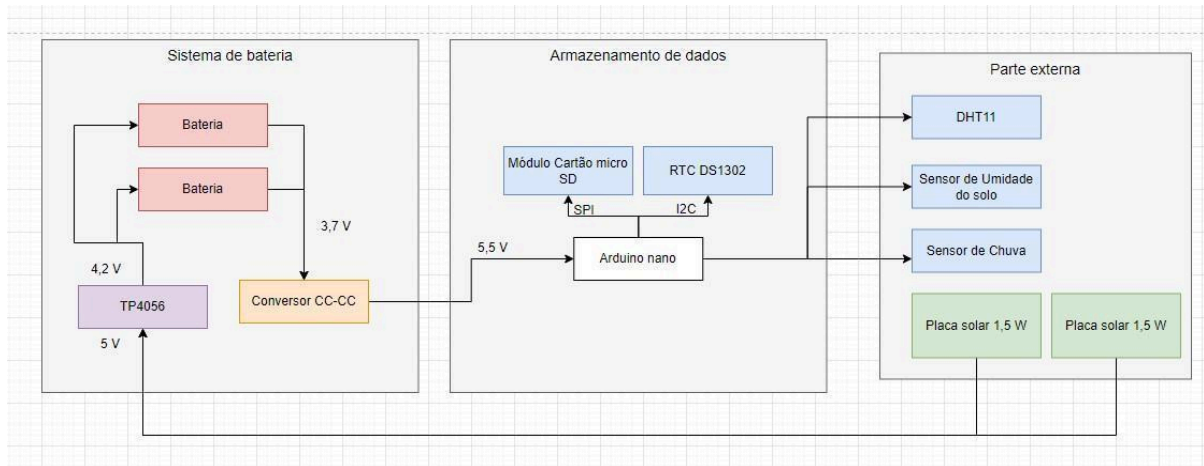
Antes da montagem completa da mini estação, foram feitos ensaios individuais com todos os sensores e módulos, em conjunto com o Arduino nano e com o auxílio de uma protoboard. Os programas para estes procedimentos iniciais exibiam apenas os valores instantaneamente, sem armazenamento, comprovando o funcionamento dos módulos.

Além dos ensaios individuais dos componentes, foi realizada uma verificação preliminar com todos os elementos funcionando de forma síncrona, também na *protoboard*. Nesse processo, os dados já estavam sendo armazenados no cartão SD. Após avaliar os componentes, o sistema de alimentação de energia elétrica também foi verificado, com o carregamento das baterias utilizadas com e sem o uso das placas solares, comprovando o funcionamento individual de todos os componentes.

A Figura 1 mostra o esquemático final do projeto piloto, com a separação física citada anteriormente. Ressalta-se que, antes dessa versão final, foram feitas duas versões prévias, discutidas em mais detalhes no relatório (KAWAKAMI, 2023).

A Figura 1 exemplifica o diagrama de blocos do sistema separado fisicamente.

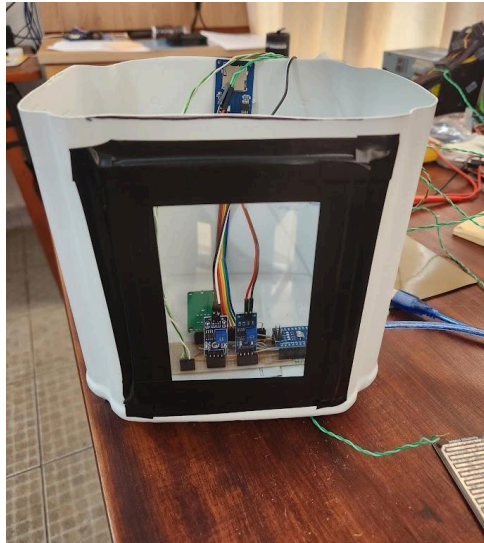
Figura 1: Diagrama de blocos do projeto piloto



Fonte: KAWAKAMI, 2023

A Figura 2 mostra a montagem física do protótipo, enfatizando os componentes da parte interna, que se encontravam dentro de um recipiente impermeável com uma placa de acrílico na parte frontal, a fim de facilitar a visualização do sistema e de sua operação. Os componentes foram montados em uma placa padrão e os fios de conexão com o restante dos componentes podem ser observados em cor verde.

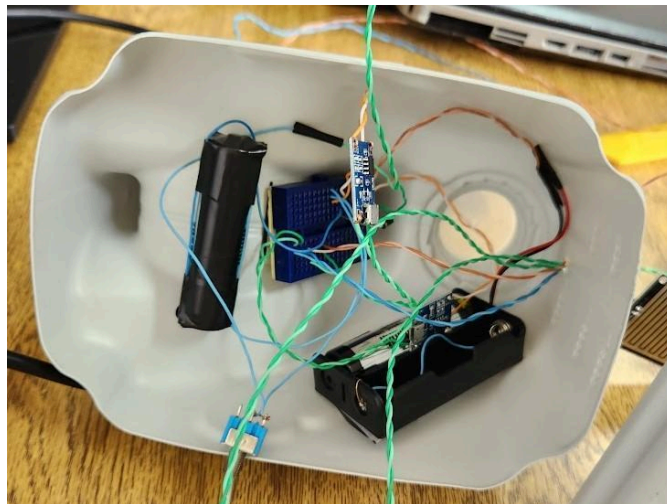
Figura 2: Montagem física do armazenamento de dados do protótipo



Fonte: KAWAKAMI, 2023

A Figura 3 mostra o sistema de carregamento e armazenamento da energia elétrica, montado em um recipiente impermeável, que pode ser acoplado à primeira parte do protótipo

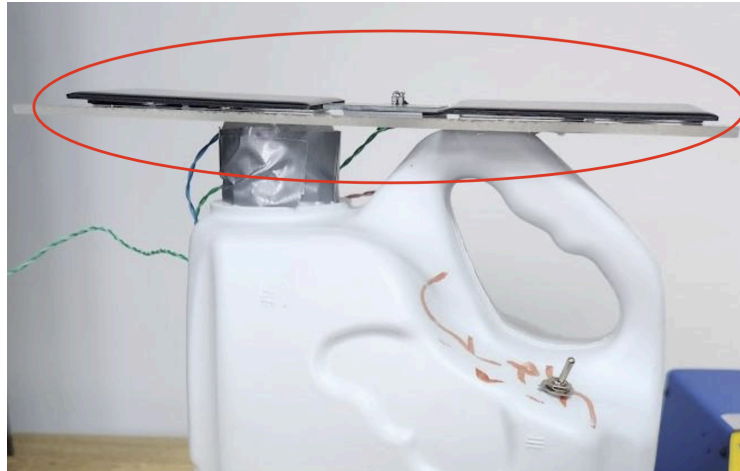
Figura 3: Montagem física do sistema de alimentação do protótipo



Fonte: KAWAKAMI, 2023

Na Figura 4, é possível observar a parte superior do projeto, que contém a parte externa da mini estação, com os sensores e placas fotovoltaicas, acopladas sobre o sistema de alimentação.

Figura 4: Montagem parcial do protótipo



Fonte: Adaptado de KAWAKAMI, 2025

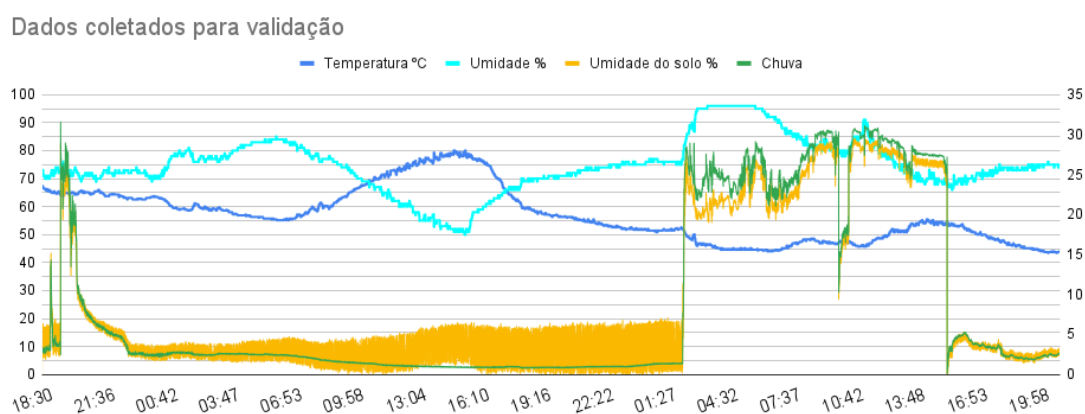
O protótipo acima possui autonomia de 30 horas, mas é importante notar que a autonomia esperada do projeto era teoricamente infinita, superior à média de consumo ao longo do dia. Especula-se que o conversor CC-CC tenha tentado fornecer corrente elétrica ao restante do circuito, mas, como a bateria não tinha mais capacidade de fornecer corrente, sua tensão foi reduzida. O conversor tentou aumentar a tensão, o que causou uma sobretensão momentânea no Arduino nano, danificando-o.

Devido a restrições de tempo para a finalização do projeto, optou-se por realizar as coletas finais sem o sistema de bateria, utilizando uma conexão na rede elétrica substituindo o sistema de alimentação autônomo, conforme ilustrado na Figura 5.

2.3 Resultados e Discussão

Foram coletados de forma *off-grid*, dados de temperatura, umidade relativa do ar, umidade do solo e chuva entre os dias 24/08/2023 e 26/08/2023, sendo essas coletas evidenciadas nos gráficos da Figura 6. A coluna de dados à esquerda refere-se às porcentagens da umidade relativa do ar, da umidade do solo e da detecção de chuva, enquanto a legenda à direita refere-se à temperatura, em graus Celsius (°C).

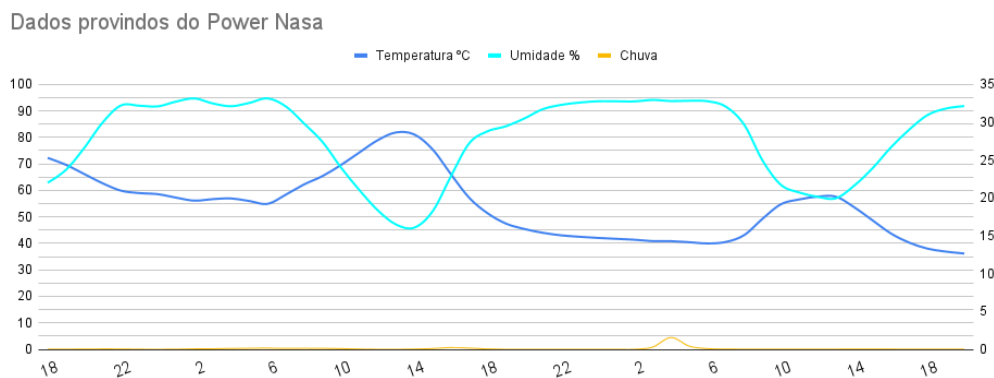
Figura 6: Gráfico de coleta de dados meteorológicos com o projeto piloto



Fonte: KAWAKAMI, 2023

Os dados do Power NASA para o mesmo período podem ser encontrados na Figura 7

Figura 7: Gráfico dos dados meteorológicos do Power NASA



Fonte: KAWAKAMI, 2023

Por meio da correlação de Pearson, verificou-se que a correlação da temperatura entre os dados coletados e os dados do Power NASA foi igual a 0,89, o que implica em uma associação positiva muito forte entre os valores. A correlação entre os valores de umidade do ar foi de 0,62, indicando uma correlação forte entre as mesmas, enquanto os valores de chuva apresentaram correlação de 0,41, sinal de correlação moderada entre os valores investigados (AKOGLU, 2018).

A respeito dos valores de umidade do ar, especula-se que a divergência entre valores tenham sido causados pelo método de coleta adotada no teste, visto que o sensor de umidade não estava posicionado a 2 metros do chão (Conforme métrica obtida pelo Power NASA), mas sim ao lado de uma cerca e sem cobertura, o que pode ter causado uma variação maior que a esperada, devido à condensação da água no sensor.

Quanto à associação obtida para os dados pluviométricos, essa pode ser justificada pelo método de coleta adotado pela mini estação, comparado ao do Power NASA, uma vez que a estação utilizou sensores de baixo custo em conjunto com um módulo sensor de chuva, afetando a confiabilidade dos resultados.

3 CALCULADORA

3.1 Metodologia

A ferramenta foi desenvolvida como um script na linguagem Python, com entrada de um arquivo do tipo *JavaScript Object Notation* (JSON), garantindo flexibilidade quanto à estrutura dos modelos analisados. Os parâmetros de entrada incluem componentes típicos de um sistema embarcado, como sensores, microcontroladores, periféricos, painéis solares e baterias, além de variáveis ambientais, como temperatura e iluminação solar.

A estimativa de consumo é realizada com base no consumo médio de corrente do sistema, calculado a partir dos dados fornecidos. O script considera tensão de operação, corrente nominal, ciclo de trabalho (*duty cycle*) e eficiência dos reguladores, combinando essas variáveis com fatores ambientais inseridos na simulação.

A saída de dados foi salva em um arquivo JSON contendo as variáveis de tempo estimado de duração da bateria ligada no circuito analisado, a corrente média dos sensores, a corrente média do microcontrolador, a corrente média dos periféricos, a corrente média total e três classes possíveis para a saúde da bateria: Otimista, Típico e Pessimista.

Além do arquivo JSON, é gerado um gráfico com a estimativa de consumo energético, apresentando uma faixa de variação para os três cenários Otimista, Típico e Pessimista, considerando incertezas externas e operacionais. O gráfico é então exportado em formato PDF, o qual pode ser incorporado a relatórios ou utilizado em documentação de projetos.

3.2 Implementação

O script utiliza as bibliotecas *json*, *os*, *matplotlib* e *math*, disponíveis para linguagem Python. A biblioteca “*json*” foi utilizada para manipular os dados de entrada, concebidos nesse formato para facilitar o uso da ferramenta; “*os*” para o acesso dos dados de entrada e o repositório de saída; “*matplotlib*”, para a geração do gráfico de saída; e, por fim, a biblioteca “*math*” na integração dos cálculos mais complexos da ferramenta.

3.2.1 Cálculos da ferramenta

Uma bateria não retém sua capacidade de armazenamento de energia elétrica de forma previsível, como mostra o modelo de MORING e MATHIEU (2022), descrito pela equação:

$$C_C = 3,087 * 10^{-7} * e^{(0,05146 * T)} * (t^m)^{0,5}$$

onde T representa a temperatura em Kelvin do local de armazenamento da bateria, t^m o tempo em meses que a bateria ficou armazenada, e C_C a degradação da bateria em porcentagem.

Há diversos parâmetros que afetam a capacidade total da bateria e a taxa de descarga dela, além do seu tempo de uso. Eles são dependentes das condições de uso e armazenamento da bateria, podendo não ser conhecidos pelos usuários da ferramenta. Os fatores incluem umidade relativa do ar no armazenamento, descarga de energia muito acentuada, ciclos de carga e descarga, sobrecarregamento, armazenamento a longo prazo entre outros (LINDEN e REDDY, 2002).

Assim, foi utilizado um parâmetro além da capacidade de armazenamento descrita acima: o intervalo de confiança. Este possui um cenário otimista, descrito somente pelo cálculo de capacidade em relação ao tempo, um cenário típico descrito da mesma forma, mas com uma perda de 10% da capacidade e, por fim, um cenário pessimista que considera uma taxa de perda de 20%. Os três cenários levam em consideração os fatores mencionados anteriormente e adicionam uma margem de erro.

Os valores de 10% e 20% de degradação foram utilizados para estimar os aspectos não contemplados na calculadora porque observa-se uma redução na perda de capacidade de baterias ao analisar modelos de degradação quando a capacidade remanescente chega a 80% (JOHNEN et al. 2021; O’KANE et al. 2022).

Fica a critério do usuário qual das estimativas será utilizada, mas recomenda-se o uso da estimativa pessimista, a qual normalmente resultará num projeto com maior capacidade do que o necessário, porém pode evitar problemas no futuro, como a degradação natural da bateria, por exemplo.

O principal atrativo da ferramenta é a estimativa do consumo de energia elétrica pelo circuito. Para o cálculo da corrente média do sensor e dos periféricos individuais, foram utilizadas as seguintes equações:

$$I_{med} = I_{nominal} * dc * ef_{regulador} / 100$$

$$I_{med} = I_{nominal} * dc$$

Onde I_{med} mede a corrente média do componente, $I_{nominal}$ a corrente nominal do componente, dada pelas suas especificações, e dc é o ciclo de trabalho do sensor. Caso haja um regulador de tensão, $ef_{regulador}$ indica a eficiência do regulador de tensão, caso contrário, usa-se a segunda equação. Note que o *duty cycle* leva em consideração somente o tempo em que o sensor ficará ativo, portanto, seu *duty cycle* pode ser diferente do *duty cycle* do microcontrolador, dependendo da programação dele.

Para calcular a corrente média do microcontrolador, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$I_{med} = \{(I_{ativo} * duty\ cycle) + [I_{baixo\ consumo} * (1 - duty\ cycle)] * (V_{out} / V_{in}) * ef_{regulador} / 100\}$$

Onde I_{med} a corrente média do microcontrolador (em mA), I_{ativo} a corrente do microcontrolador quando ele está ativo, $I_{baixo\ consumo}$ é a corrente do microcontrolador quando ele está em modo de economia de energia, *duty cycle* é o ciclo de trabalho dele, V_{out} é a tensão da bateria (em V), V_{in} é a tensão do microcontrolador e $ef_{regulador}$ é a eficiência do regulador.

Para o cálculo da corrente média da soma dos periféricos, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$I_{soma\ periféricos} = \sum I_{med}$$

A calculadora considera ainda a possibilidade do uso de reguladores de tensão caso a adequação da tensão seja necessária. Por exemplo, se for usada uma bateria com tensão nominal maior que a do microcontrolador, o consumo de corrente também é modificado, ocasionando um menor consumo de corrente na bateria em comparação com o microcontrolador. Com o uso de um regulador do tipo *buck-converter*, a perda de potência é reduzida de acordo com o modelo e a configuração utilizada (ROHM, 2022). Como a potência entre os valores entre a entrada e saída devem ser mantida, exceto pela perda de acordo com a eficiência temos que:

$$P_{OUT} = P_{IN} * efficiency$$

Dada a fórmula de potência:

$$P = U * I$$

Onde P é a potência elétrica, U é a tensão elétrica e I é a corrente elétrica. Tem-se que:

$$U_{OUT} * I_{OUT} = U_{IN} * I_{IN} * eff$$

$$I_{IN} = (U_{OUT} * I_{OUT}) / U_{IN} * eff$$

Onde P_{OUT} é a potência elétrica de saída do regulador buck-converter, nesse caso a potência que alimenta o componente descrito, P_{IN} é a potência que sai da bateria, eff a eficiência do conversor *buck-converter*, U_{OUT} a tensão do componente alimentado, I_{OUT} a corrente consumida pelo componente alimentado U_{IN} a tensão da bateria e I_{IN} a corrente fornecida pela bateria. Assim, a última fórmula evidenciada acima descreve a corrente que efetivamente é fornecida pela bateria na calculadora, utilizada no cálculo de duração da bateria.

Para estimar a energia elétrica gerada pela placa fotovoltaica, foi utilizada a seguinte fórmula (ZIENTARA, 2025):

$$P_{generated} = (P_N * t_{sun}) / t_{day}$$

Onde $P_{generated}$ é a potência elétrica gerada pela placa solar, P_N a potência elétrica nominal da placa fotovoltaica utilizada, t_{sun} o número médio de horas de sol por dia no local de implementação do circuito e t_{day} o número de horas no dia, fixado em 24 horas. Porém, foi considerado o uso de um controlador para carregar a bateria. Assim, deve-se levar em consideração a eficiência desse dispositivo, portanto a fórmula de corrente fornecida à bateria, utilizada em conjunto com a fórmula de potência elétrica, é descrita pela seguinte equação:

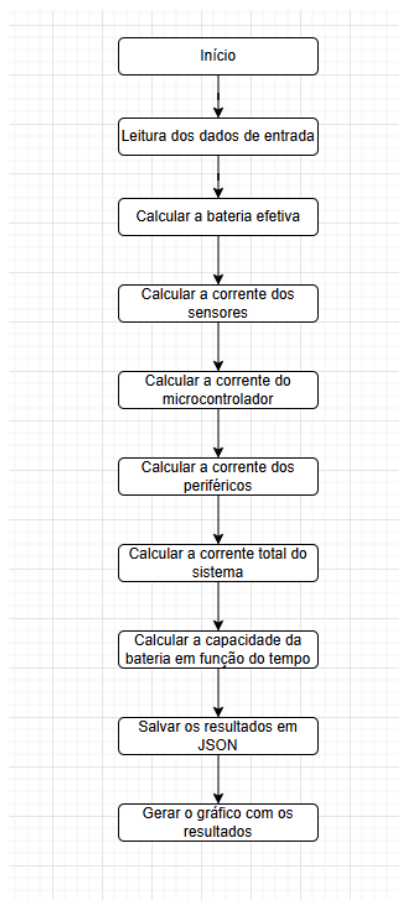
$$I_{battery} = (P_N * t_{sun}) / (t_{day} * eff * U_{battery})$$

Onde $I_{battery}$ é a corrente fornecida à bateria, P_N a potência elétrica nominal da placa fotovoltaica, t_{sun} o número médio de horas no dia, t_{day} é o número de horas do dia, fixado em 24 horas, eff é a eficiência do controlador do carregamento da bateria e $U_{battery}$ a tensão da bateria.

3.2.2 Funcionamento da Ferramenta

O diagrama de blocos da Figura 8 demonstra o funcionamento geral da ferramenta:

Figura 8: Diagrama de blocos da ferramenta



Fonte: Própria, 2025

A estrutura de entrada foi organizada como o trecho de código exemplo abaixo demonstra:

```

{
  "sensor": {
    "voltage": 5,
    "current": 3.9,
    "duty_cycle": 0.5,
  }
}

```

```

    "regulator_efficiency": 100
  },
  "microcontroller": {
    "voltage": 5,
    "active_current": 25,
    "sleep_current": 5,
    "duty_cycle": 0.067,
    "regulator_efficiency": 100
  },
  "peripherals": [
    {
      "voltage": 5,
      "current": 30,
      "efficiency": 6.7
    },
    {
      "voltage": 5,
      "current": 0.43,
      "efficiency": 6.7
    }
  ],
  "solar_panel": {
    "power": 90,
    "sunlight_hours": 12,
    "voltage": 18,
    "controller_efficiency": 80,
  },
  "battery": {
    "capacity": 150,
    "voltage": 5,
    "battery_age_months": 48
  },
  "environment": {
    "temperature": 20
  }
}

```

Cada bloco contém parâmetros específicos

- Sensor: tensão (V), corrente (mA), ciclo de trabalho, eficiência do regulador (%).

- Microcontrolador: corrente em modo ativo e em modo de sono (mA), tensão (V), ciclo de trabalho ou eficiência (%).
- Periféricos: múltiplos elementos com diferentes características de tensão (V), corrente (mA) e eficiência ou ciclo de trabalho (%).
- Painel solar: potência nominal (W), média do número de horas de sol por dia (h), tensão nominal (V) e eficiência do controlador (%).
- Bateria: capacidade (mAh), tensão (V), eficiência (%), idade (meses).
- Ambiente: temperatura de armazenamento da bateria (°C).

A ferramenta é modular, ou seja, permite que somente os blocos a serem utilizados sejam inseridos, assegurando flexibilidade e aplicabilidade a diferentes projetos.

3.3 Estrutura de Testes e Aplicações Propostas

Para a realização da validação da ferramenta, foram utilizados quatro circuitos distintos e um sistema de medição, com o objetivo de avaliar a precisão das estimativas de consumo energético em relação aos valores reais medidos. Optou-se pelo desenvolvimento de um sistema de medição, considerando-se o maior acesso aos dados coletados, o menor custo e o aprendizado que acompanha tal processo.

Também foram utilizados circuitos sem a presença de placas fotovoltaicas ou reguladores de tensão *buck-converters*, pois não havia placas fotovoltaicas cujo dimensionamento fosse adequado para os circuitos utilizados e foi empregada uma bateria cuja tensão nominal era igual à dos componentes utilizados, não sendo, portanto, necessário o uso desses reguladores.

3.3.1 Sistema de medição

O sistema de medição foi desenvolvido com base na medição de corrente fornecida pela bateria para o circuito em teste. Foi utilizado um Arduino nano em conjunto com um módulo sensor de corrente para realizar essas medições.

Os valores de corrente foram coletados a cada 0.1 segundo, garantindo a captação da variabilidade no consumo de corrente de acordo com o componente. Ao final da medição,

calculou-se a média da corrente, que foi então comparada com o valor estimado pela ferramenta para o mesmo circuito.

Foi utilizado um *Power Bank* para fazer as medições, já que ele será utilizado no futuro pelo BIOMA-Tech para a alimentação de circuitos em locais sem acesso à rede elétrica ou com acesso dificultado. Para o teste da estimativa de carga do *Power Bank*, esse foi ligado em um circuito de valores de consumo conhecidos até que a bateria não conseguisse alimentar mais o sistema e foi utilizado o circuito de coleta de corrente, onde a corrente foi medida a cada 0,1 segundo, e a média do consumo no período foi calculada e dividida pela duração total de funcionamento.

Sabendo que o *Power Bank* possui uma capacidade nominal de 150 mAh, e um tempo de uso de aproximadamente quatro anos no momento da utilização, utilizou-se o cálculo de consumo médio do próprio circuito de medição. Foi aplicada, então, a seguinte fórmula:

$$I_{med} = \Sigma I_{n_{medido}} / n_{total}$$

Onde I_{med} é a corrente média da medição (em mA), $I_{n_{medido}}$ a corrente medida pela medição individual em análise, e n_{total} é o número total de medições realizadas.

Para o cálculo da capacidade da bateria, foi utilizada a seguinte fórmula (REKOSER, 2023):

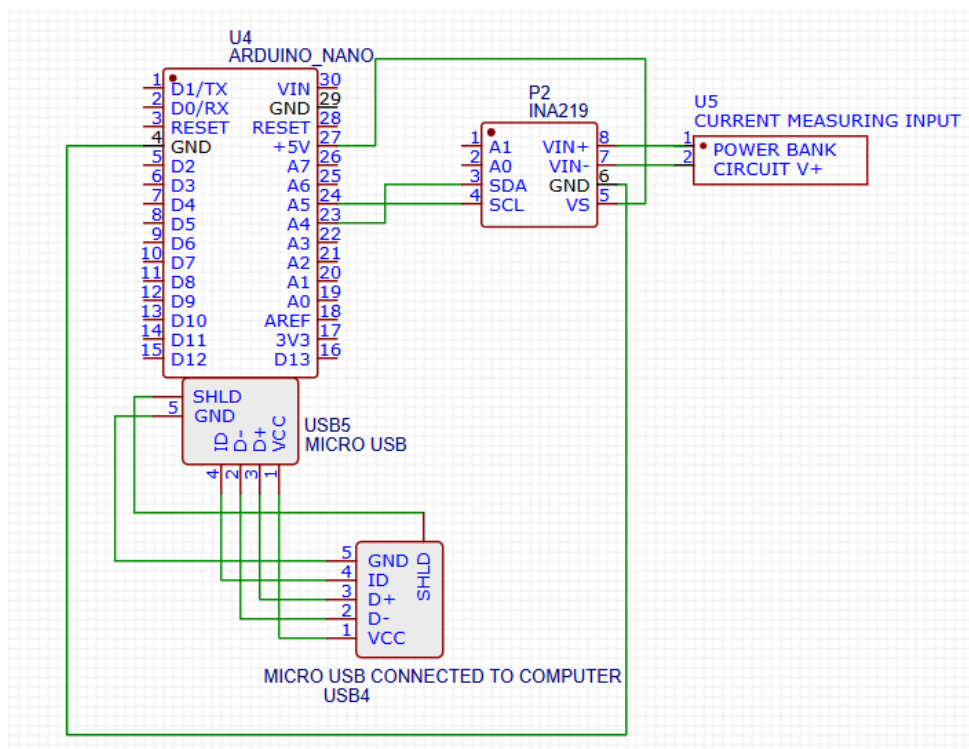
$$C = I_{med} * t$$

Onde C é a capacidade da bateria, I_{med} a corrente média calculada pela fórmula anterior e t , o tempo que a bateria consegue fornecer corrente para o circuito analisado, conforme detalhado na seção seguinte.

A captação dos dados é realizada por meio da conexão entre o computador e o Arduino Nano e os valores aferidos são salvos em formato de CSV com o auxílio do programa PuTTY, conforme descrito em (MECHATROFICE, 2021).

O esquemático do circuito de medição para verificação pode ser observado na Figura 4.2.

Figura 9: Esquemático do circuito de medição para verificação.



Fonte: Própria, 2025

3.3.2 Descrição dos testes

A ferramenta foi utilizada para verificar os valores calculados dos seguintes sistemas:

- Teste 1: Teste da bateria
- Teste 2: Teste com microcontrolador e LEDs
- Teste 3: Teste com microcontrolador com sensores
- Teste 4: Testes com Motor CC simulando um servidor

Os testes possuem os materiais descritos na Tabela 4.1

Tabela 2: Componentes dos testes práticos

Componente	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço total (R\$)	Valor gasto (R\$)	Descrição
Arduino nano	2	30	60	0	Microcontrolador utilizado
Light-Emitting Diode (LED) amarelo	3	0,14	0,42	0	LED para consumo de energia elétrica
Micro USB conectado em um Computador	1	12	12	0	Conexão entre o Arduino e o Computador
Módulo MPU-6050	1	16	16	16	Módulo acelerômetro
Motor CC 5V	2	1,6	3,2	0	Motor 5V para consumo de energia elétrica
Notebook Lenovo ideapad i5-330	1	1100	1100	0	Notebook para captação dos dados via porta serial
Power Bank de capacidade nominal de 150mAh	1	12	12	0	Power Bank para alimentação do sistema
Resistor de 150 Ω	3	0,13	0,39	0	Resistor para limitar a corrente do LED
Módulo INA 219	1	14	14	14	Sensor de corrente
USB conectado ao Power Bank	1	12	12	0	USB para conectar o Power Bank ao circuito
Total	16	-	1230,01	30	-

Fonte: Própria, 2025

Note que o notebook descrito na lista de materiais pode ser qualquer computador com uma entrada USB para receber dados via porta serial do Arduino, e não foi contabilizado no custo total do projeto. No teste, o autor utilizou um computador próprio para a captação dos dados.

Na tabela 2, foram dispostos os componentes, junto com suas respectivas quantidades, preço unitário, preço total, valor gasto e descrição. Note que os componentes cujo valor gasto é zero não foram comprados para o projeto, pois já estavam disponíveis para uso no BIOMA-Tech, com a exceção do notebook, descrito anteriormente. Caso o laboratório não tivesse grande parte dos componentes disponíveis, o custo total dos circuitos de testes da calculadora, com exceção do notebook, seria de *R\$ 130,01*, porém, como os componentes estavam disponíveis no laboratório, o projeto custou *R\$ 30,00*.

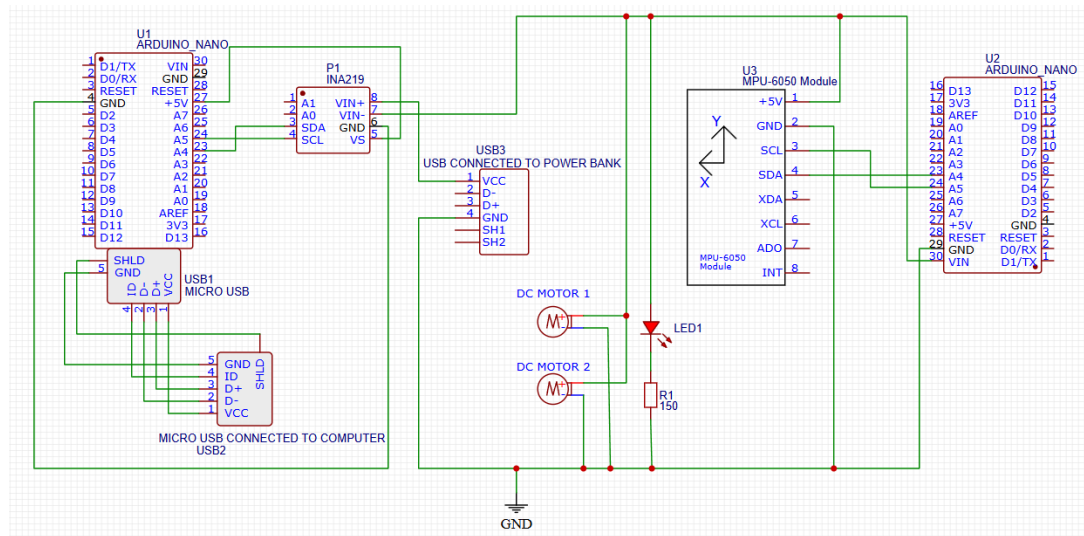
O primeiro teste foi realizado com o intuito de avaliar a capacidade de predição da bateria da ferramenta com o consumo total da bateria do *Power Bank* utilizado. Com o circuito de medição, a corrente e o tempo desde o início do teste foram registrados. Assim que a bateria parasse de fornecer corrente, o teste foi finalizado.

Os dados foram analisados, identificando o tempo em que o último registro de corrente foi diferente de zero, e a média dos valores de corrente ao longo do teste foi calculada. Com isso, foi realizado o cálculo da capacidade total de energia do *Power Bank*.

Foram utilizados os componentes mencionados acima para que o consumo de energia elétrica fosse maior, facilitando o processo de coleta de dados. A Figura 10 contém um diagrama do teste, e a Figura 11 ilustra sua montagem física. Nota-se que os componentes alimentados pelo Power Bank, dispostos à direita da Figura 10, estavam em funcionamento enquanto o Arduino nano estava ativo e coletando os dados do acelerômetro do módulo MPU-6050, o LED emitia luz e os motores estavam rodando.

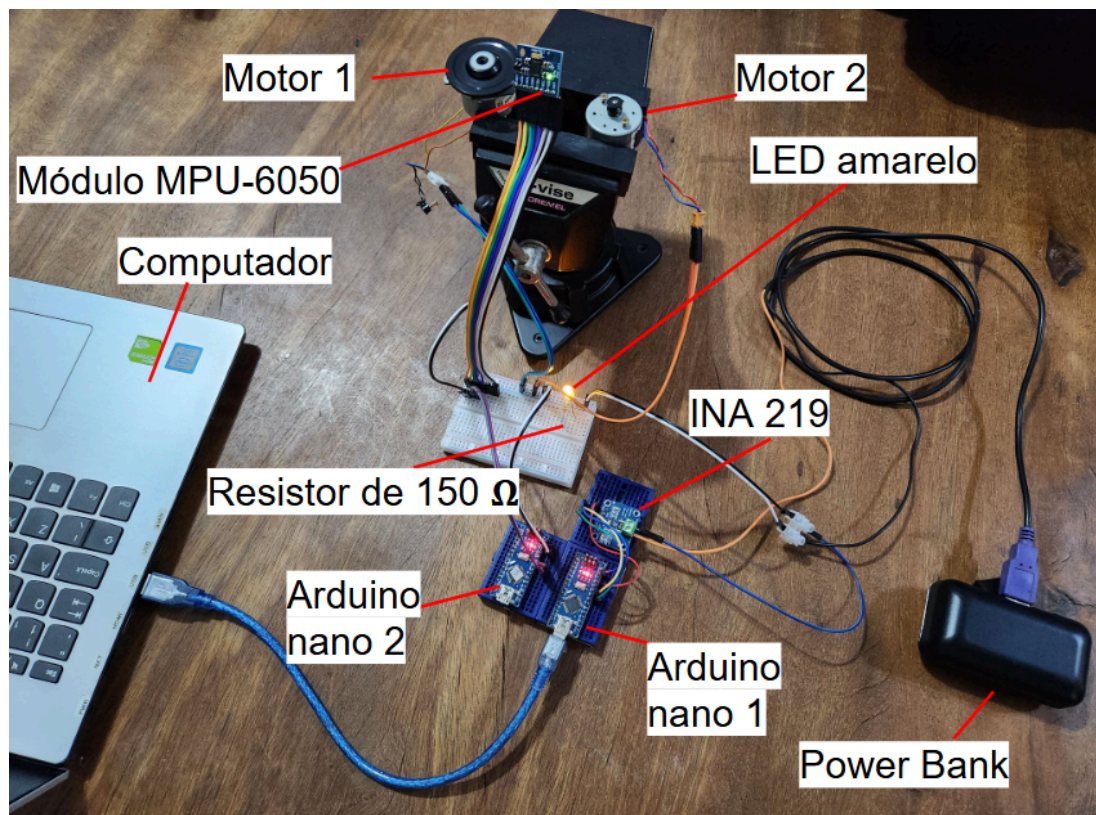
Na Figura 10, podem ser observados dois circuitos: o circuito do medidor de corrente e o circuito de teste de bateria, sendo que a conexão entre eles é feita somente entre a fonte de energia do circuito do teste de bateria, o *Power Bank* e o medidor de corrente INA 219.

Figura 10: Esquemático do circuito de teste de bateria



Fonte: Própria, 2025

Figura 11: Montagem física do circuito de teste de bateria



Fonte: Própria, 2025

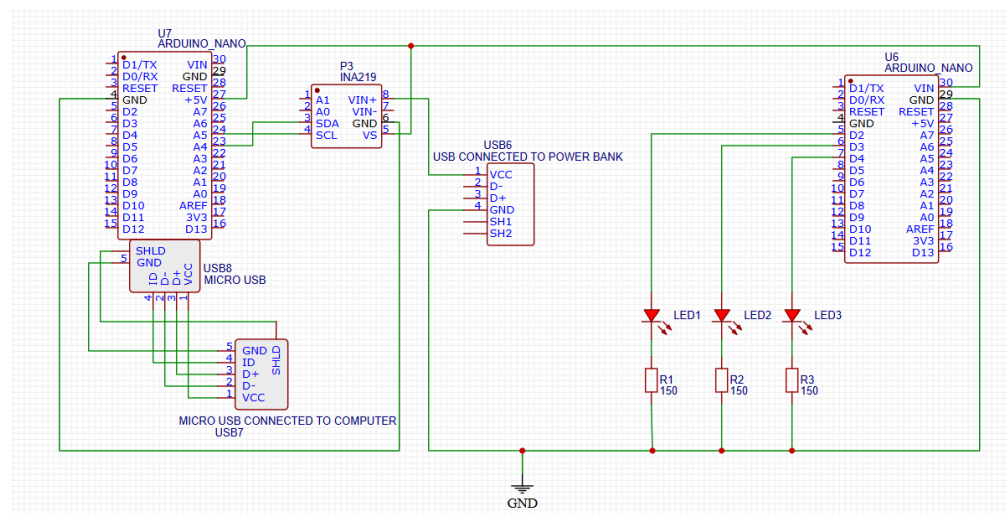
O Teste 2 consiste dos seguintes componentes:

- Arduino nano
- 3 LEDs amarelo
- Resistor de 150 Ω

O teste buscou evidenciar o funcionamento de um sistema cujo *duty cycle* era de 0,66, em que o Arduino funcionou numa duração equivalente a um terço do tempo em modo de baixo consumo e dois terços operando normalmente, o que corresponde ao mesmo consumo de quando ele está em operação, ligando e desligando os LEDs em sequência, mimetizando uma coleta de dados, porém com componentes mais simples. Foi utilizada a biblioteca *LowPower* da *LowPowerLab* para fazer o Arduino entrar no modo de baixo consumo.

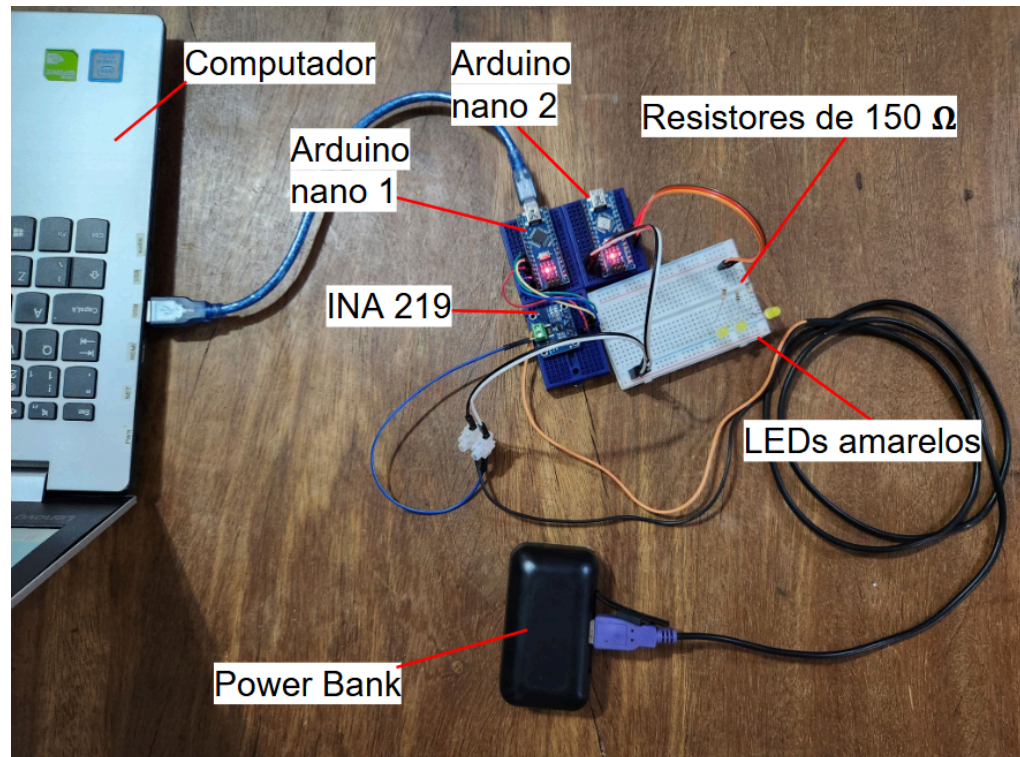
A Figura 12 mostra o esquemático do circuito montado para este teste e a Figura 13 mostra a montagem física do circuito.

Figura 12: Esquemático do teste com LEDs



Fonte: Própria, 2025

Figura 13: Montagem física do teste com LEDs



Fonte: Própria, 2025

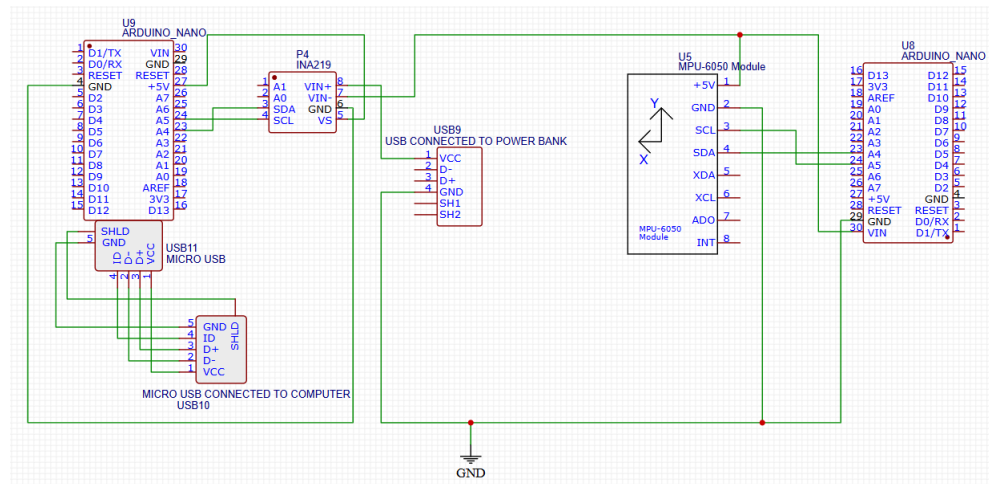
O Teste 3 consiste dos seguintes componentes:

- Arduino nano
- Módulo acelerômetro MPU-6050

O teste buscou a validação da coleta de dados com um sensor acelerômetro ativo e operante. Foram realizadas diversas coletas, com a aquisição de 10, 50 pontos e 100 pontos por segundo, respectivamente, a fim de verificar se havia uma diferença significativa no consumo de corrente do sistema conforme aumento da taxa de aquisição, um dado extremamente relevante para o BIOMA-Tech.

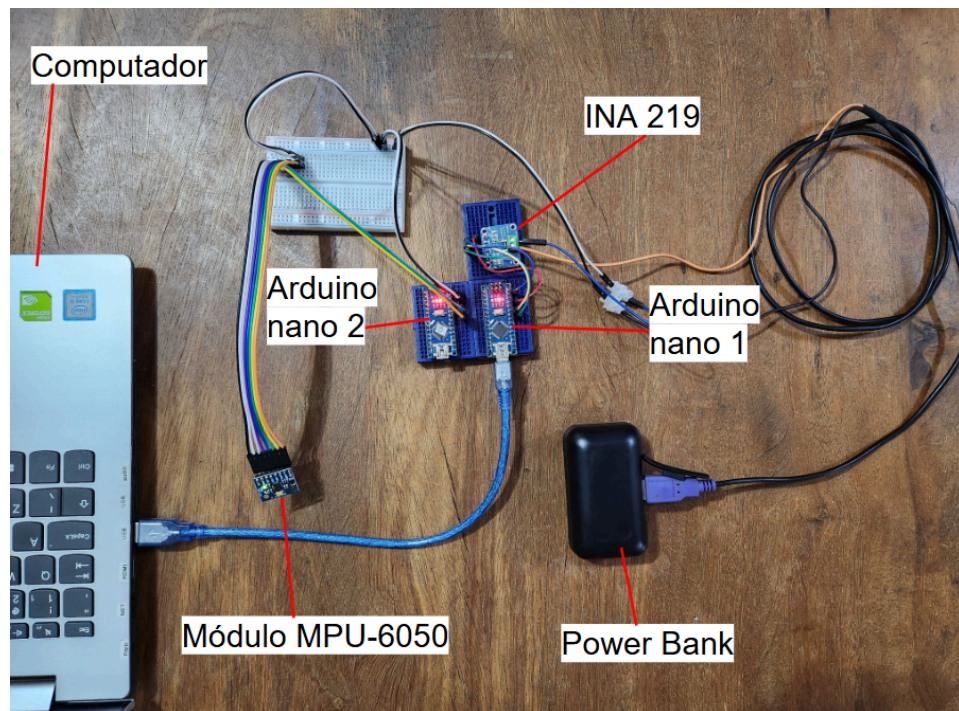
A Figura 14 mostra o esquemático do Teste 3, e a Figura 15 mostra a montagem física do circuito.

Figura 14: Esquemático do teste com acelerômetro



Fonte: Própria, 2025

Figura 15: Montagem física do teste com acelerômetro

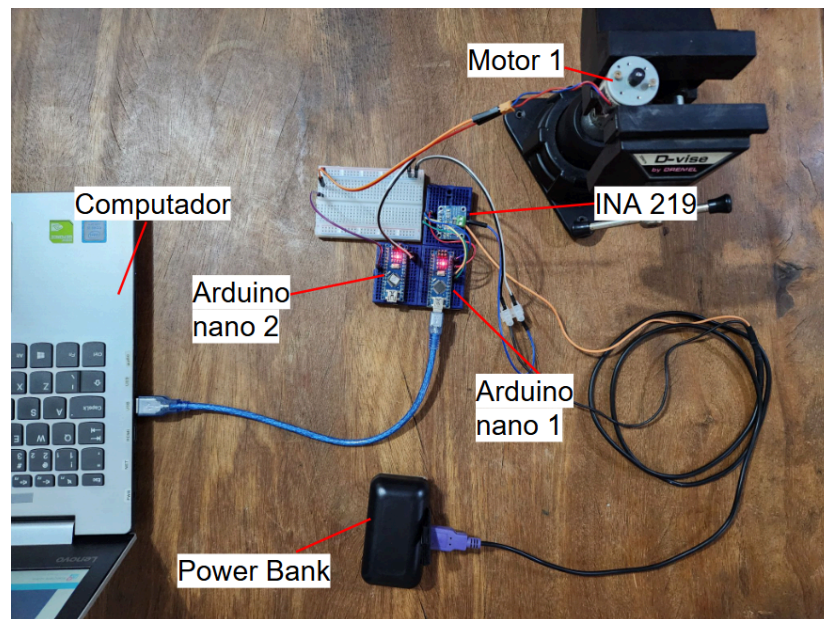


Fonte: Própria, 2025

O Teste 4 consiste dos seguintes componentes:

- Arduino nano
- Motor CC 5V
- Resistor de 10 kΩ

Figura 17: Montagem física do teste com motor CC



Fonte: Própria, 2025

3.4 Entradas e Saídas da simulação

Para a realização das simulações, foram utilizados os dados disponíveis *online* de corrente e tensão nominais dos componentes utilizados, com preferência pela utilização de seus *datasheets*, porém, quando eles não estavam disponíveis, foram utilizados os valores fornecidos por vendedores dos equipamentos. O restante dos dados, tais como o ciclo de trabalho, a temperatura, a idade da bateria e eficiência foram definidos de acordo com a aplicação de cada teste, os componentes disponíveis localmente e as condições de armazenamento da bateria.

As tabelas com os dados de entrada e saída estão dispostas no Apêndice A. Note que apenas os dados necessários para a simulação de cada teste foram utilizados para a entrada, assim como somente os dados relevantes comparáveis aos valores de entrada foram dispostos nas tabelas de saída.

3.5 Resultados e Discussões dos Testes

Os testes experimentais tinham como principal objetivo a validação da ferramenta computacional, desenvolvida para estimar o consumo energético e a capacidade de fornecimento de energia elétrica por baterias. Os valores obtidos pela simulação tiveram como entrada os dados nominais dos componentes utilizados (ou valores calculados com base neles), com o objetivo de simular os valores na ausência física dos componentes.

Espera-se que os resultados obtidos com a realização dos testes apresentem valores similares aos calculados pela ferramenta, com diferenças reduzidas entre eles. Diversos fatores podem contribuir para pequenas discrepâncias, como as tolerâncias dos componentes eletrônicos utilizados, a temperatura ambiente e, principalmente, a precisão dos instrumentos de medição.

É importante que todas as tolerâncias dos componentes e as limitações dos instrumentos sejam consideradas na análise de um circuito eletrônico (Boylestad e Nashelsky, 2014), visto que em geral, qualquer medida tem imperfeições que trazem um erro na sua medição (ISO/IEC Guide 98-3, 2008).

Para o cálculo do erro das Tabelas 3 e 4 foi utilizada a seguinte equação (CAMPILHO, s.d.):

$$Erro = |V_{medido} - V_{Simulado}| / V_{Simulado}$$

Onde o *Erro* é o erro medido, V_{medido} ao valor medido (em V) e $V_{Simulado}$ o valor simulado (em V). Com a realização dos testes práticos, foram obtidos os valores de capacidade da bateria, para o Teste, 1 e os valores de corrente média para o restante dos testes, assim como os erros, calculados pela fórmula acima.

Tabela 3: Resultado do valor de capacidade de bateria do teste 1

Cálculo	Simulado (mAh)	Medido (mAh)	Diferença (mAh)	Erro (%)
Pessimista	105,38	113,14	7,76	7,36
Típico	118,56	113,14	5,42	4,57
Otimista	131,73	113,14	18,59	14,11

Fonte: Própria, 2025.

Tabela 4: Resultados da média de corrente dos testes

Teste	Simulado (mA)	Medido (mA)	Diferença (mA)	Erro (%)
Teste 1	79,00	79,41	0,41	0,52
Teste 2	31,4	30,53	0,87	2,77
Teste 3 (10 Hz)	28,9	29,54	0,64	2,21
Teste 3 (50 Hz)	28,9	29,73	0,83	2,87
Teste 3 (100 Hz)	28,9	29,90	1	3,46
Teste 4	8,83	8,78	0,05	0,57

Fonte: Própria, 2025.

Durante os testes de capacidade de bateria, observou-se que o resultado com a menor diferença entre o valor calculado e o valor medido (Tabela 4) foi o do cenário típico, com um erro de 4,57%. Esse resultado está dentro da margem de erro esperada para as estimativas de capacidade de baterias, considerando as incertezas envolvidas no processo. A diferença entre os cenários otimista e pessimista, definidos, respectivamente, como o cálculo considerando apenas a degradação da bateria por tempo de armazenamento e o cálculo com uma perda adicional de 20%, justifica-se pela ausência de dados normalmente indisponíveis para análise, como a taxa de descarga real, o número exato de ciclos de carga e descarga, e a eficiência individual da célula utilizada.

Como o valor medido está dentro da faixa de valores esperada, pode-se afirmar que o cálculo da estimativa da capacidade da bateria está satisfatório. Caso fosse utilizado o valor pessimista, o projeto estaria com uma projeção além do valor real, considerando o valor medido, mas, se fosse utilizado um valor típico, haveria um erro entre eles de 4,57%.

Ao realizar os testes de consumo de energia, não foi notado nenhum dado atípico, confirmando uma boa diligência operacional. Notou-se, ainda, que a diferença absoluta entre os valores simulados e os valores medidos dos testes de corrente não excedeu 1 mA, e o erro percentual ficou abaixo de 4% em todos os casos.

O sensor utilizado foi o Módulo Arduino INA 219, cujo conversor Analógico-Digital possui 12 bits (TEXAS INSTRUMENTS, 2008), e, a sua corrente de medição máxima é de 3,2 A (AMARAL, 2017). Assim, a resolução dele pode ser determinada pela fórmula abaixo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2024):

$$Resolução = I_{max} / 2^n$$

onde I_{max} é a corrente máxima que pode ser medida (em mA), e n é o número de bits do conversor Analógico-Digital do componente. Utilizando-se os dados de número de bits, a corrente de medição máxima e a equação descrita anteriormente, calcula-se que a resolução do INA 219 é de 0,78 mA, o que implica que variações de valores inferiores a esse valor podem não ser registradas pelo sensor, o que limita a precisão da leitura. Esse aspecto, somado às imprecisões destacadas anteriormente, bem como ao fato de que o valor calculado mais divergente do valor medido é de 1 mA, permite afirmar que a diferença dos valores da Tabela 4.2 está dentro da margem de erro esperada. Com isso, evidencia-se a confiabilidade do sistema de cálculo desenvolvido.

Dada essa validação, pode-se esperar que pesquisadores da área de sensoriamento da medicina veterinária utilizem o script desenvolvido como uma ferramenta de apoio ao desenvolvimento de projetos eletrônicos. Esse script pode auxiliar no dimensionamento do sistema de alimentação, na estimativa da bateria necessária para um determinado tempo de operação, na otimização do consumo energético de sistemas já implementados em campo ou, ainda, na estimativa de tempo de funcionamento remanescente caso algum componente seja retirado do projeto, como, por exemplo, uma placa de carregamento fotovoltaica.

Tanto sistemas simples quanto complexos podem ser beneficiados pelo uso da ferramenta de cálculo desenvolvida, como, por exemplo um sistema complexo de monitoramento de colméias equipado com diversos sensores (ANWAR, et al., 2022), ou sistemas com *hardware* mais simples, como um sistema de monitoramento de pastagem de gado com um GPS e um acelerômetro (BRENNAN, JOHNSON e OLSON, 2021). Com a utilização da ferramenta, pode-se estimar, com uma boa precisão, o consumo esperado do

sistema como um todo, assim como utilizar a seção de estimativa de capacidade de baterias para analisar, ao longo do tempo, como ela vai se comportar.

4 CONCLUSÃO

Os dois principais objetivos deste trabalho foram a validação dos dados fornecidos pelo Power NASA e o desenvolvimento de um script de cálculo de consumo energético para sistemas eletrônicos, voltado a usuários com pouca experiência técnica.

O primeiro objetivo foi cumprido a partir da comparação entre os dados coletados pela estação meteorológica e pela plataforma *online* Power NASA, observou-se uma fortíssima correlação entre os valores de temperatura (0,89) e uma moderada associação entre os dados de umidade do ar (0,62) e de chuva (0,41). Como especula-se que essas baixas correlações foram causadas pelo método de coleta diferente entre os sistemas, conclui-se que os dados do Power NASA foram validados, mas que os dados de umidade e chuva exigem uma interpretação mais cautelosa. Devido às restrições de tempo, não foi possível finalizar o sistema de carregamento e armazenamento de energia elétrica da mini estação, uma vez que os estudos necessários para isso não foram realizados até o término do período de vigência do projeto. Ainda assim, o principal objetivo do sistema de monitoramento climático foi alcançado com sucesso.

Para o segundo objetivo, foi verificada a confiabilidade da ferramenta do script desenvolvido com um circuito de medição de corrente, utilizado em testes simulando aplicações reais de projetos futuros do BIOMA-Tech. Os resultados demonstraram boa precisão, cujos erros se encontram dentro da margem de erro esperada de 0,78 mA somada às incertezas dos componentes.

Como avanços futuros da mini estação, destaca-se a implementação de um sistema de alimentação com autonomia indeterminada, permitindo a coleta contínua de dados sem depender da rede elétrica, o que amplia sua aplicação em diversos ambientes. O projeto da mini estação foi continuado e evoluído por outro integrante do laboratório após o término do período de vigência inicial e o conceito de comparação entre bases de dados climatológicos reais e do Power NASA foi utilizado em outros estudos comparativos dentro do laboratório.

Como melhorias futuras do script de cálculo, destacam-se a criação de uma interface gráfica *front-end* para facilitar seu uso, a realização de mais testes com diferentes tipos de baterias além dos Power Banks, e com circuitos que demandem mais energia elétrica ou operem com valores de tensão diferentes entre os componentes e a bateria, exigindo reguladores de tensão. Também se recomenda a realização de testes com sistemas de carregamento como placas solares. Espera-se que os integrantes do BIOMA-Tech utilizem a

ferramenta de cálculo para o desenvolvimento de novos projetos envolvendo circuitos eletrônicos, como a coleta de dados ambientais, a utilização de *Power Banks* para alimentar sistemas de monitoramento, entre outros.

REFERÊNCIAS

- AKOGLU, Haldun. User's guide to correlation coefficients. Turkish journal of emergency medicine, v. 18, n. 3, p. 91-93, 2018. Disponível em <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6107969/>. Acesso em 20 jun 2025.
- AMARAL, H. Maker Hero, 2017. Medindo corrente e tensão com o módulo INA219. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/medindo-corrente-e-tensao-modulo-ina219/?srsltid=AfmBOoo7ySBXgVYGCTS8jrzm0MnMgUkYcS6LbAbcZWtZ46CYcaehCyr>. Acesso em: 27 maio 2025.
- ANWAR, Omar. Design and development of low-power, long-range data acquisition system for beehives - BeeDAS. Computers and Electronics in Agriculture 201, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922005932>. Acesso em: 27 maio 2025
- BATTERY UNIVERSITY. Battery University, 2021. BU-502: Discharging at High and Low Temperatures. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/article/bu-502-discharging-at-high-and-low-temperatures>. Acesso em: 27 maio 2025
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2014.
- BRENNAN, J; JOHNSON, P.; OLSON, K. Classifying season long livestock grazing behavior with the use of a low-cost GPS and accelerometer. Computers and Electronics in Agriculture 181, 2021. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920331628>. Acesso em: 27 maio 2025.
- CAMPILHO A. A Medição e o Erro de Medição. Porto: [s. n.], [s. d.]. Disponível em <https://web.fe.up.pt/~campilho/IM/NOTES/cap1.pdf>. Acesso em: 28 maio 2025.
- MORING, H.;MATHIEU, J. L. Scheduling Battery Energy Storage Systems Under Battery Capacity Degradation Uncertainty, 2022, American Control Conference (ACC), Atlanta, GA, USA, 2022, pp. 5300-5307, doi: 10.23919/ACC53348.2022.9867461.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). Geneva: ISO, 2008.

JOHNEN, M. et al. Modeling long-term capacity degradation of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage* 34, 2021. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X20318466>. Acesso em: 27 maio 2025.

KAWAKAMI, R. K. M. Estimação da massa de forragem por meio de imagens aéreas capturadas via drone: Obtenção de dados climáticos via construção de estação meteorológica. Pirassununga: USP, 2023. Disponível em: <https://uspdigital.usp.br/jupiterweb/beneficioBolsaUnificadaListar?codmnu=6684#> . Acesso em: 27 maio 2025.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B. (Ed.). *Handbook of batteries*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

MARWA, C.; OTHMAN, S. B.; SAKLI, H. IoT Based Low-cost Weather Station and Monitoring System for Smart Agriculture. In: 2020 20th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). [S.l.: s.n.], 2020. P. 349–354. DOI: 10.1109/STA50679.2020.9329292.

MECHATROFICE, 2021. mechatroface.com. Save Serial data to a text file – Arduino, Processing, PuTTY. Disponível em <https://mechatroface.com/arduino/save-serial-data-to-a-text-file-arduino-processing-putty>. Acesso em: 27 maio 2025.

MLA. Part A - Weather station review. Sydney: MLA, 2013. Disponível em: https://www.mla.com.au/contentassets/f0556acb02df49a3917ef38119ff629b/b.flt.0386.a_final_report.pdf. Acesso em 20 jun 2025.

NASA POWER, 2025. NASA. power.larc.nasa.gov . Data Sources. Disponível em: [https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/sources/#:~:text=assessing%20climate%20trends-,Precipitation,longitude%20grid%20\(approximately%2010km\)](https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/sources/#:~:text=assessing%20climate%20trends-,Precipitation,longitude%20grid%20(approximately%2010km)). Acesso em 20 jun 2025.

NATIONAL INSTRUMENTS, 2024. [ni.com](https://www.ni.com). Resolution. Disponível em: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-daqmx/page/resolution.html?srsId=AfmBOorg6jDzNZMd8UPfReAnYbau3-DKeeuwGZwPJtrWkJBUUSH7M0iv>. Acesso em: 27 maio 2025.

NEETHIRAJAN, S. The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. In: *Sensor and Vio-Sensing Research*, Volume 29, 2020. DOI: 10.0367/ISSN2214-1804.

NEUTERT, S. of-things, 2016. Simple calculator for estimating a (LiPo) battery's life. Disponível em: <https://www.of-things.de/>. Acesso em: 27 maio 2025.

- O'KANE, S. E. J. et al. Lithium-ion battery degradation: how to model it. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2022, 24, 7909-7922. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/cp/d2cp00417h>. Acesso em: 28 maio 2025
- REKOSER, 2023. rekoser.com. How to measure battery capacity. Disponível em: <https://rekoser.com/blog/how-to-measure-battery-capacity/#:~:text=The%20capacity%20of%20a%20battery,as%20temperature%20and%20discharge%20rate>. Acesso em: 27 maio 2025.
- ROHM SEMICONDUCTOR. Efficiency of Buck Converter. Kioto, Japão, 2022. Disponível em: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/buck_converter_efficiency_app-e.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.
- SHOCK, D. A. et al. Studying the relationship between on-farm environmental conditions and local meteorological station data during the summer. *Journal of dairy science*, v. 99, n. 3, p. 2169-2179, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030216000102>. Acesso em 20 jun 2025
- SMITH, N, 2020. climbers.net. IoT Battery Runtime calculator. Disponível em: <https://climbers.net/sbc/iot-battery-runtime-calculator/>. Acesso em: 27 maio 2025.
- STACKHOUSE, P. POWER Data Methodology. [S.l.: s.n.]. <https://opencv.org/about/>. Acesso em 29 de ago. de 2023.
- TEXAS INSTRUMENTS. INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface. Dallas, Texas, EUA: Texas Instruments, 2008. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf?ts=1748326591462&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Acesso em: 27 maio 2025.
- WILLIAMS, M.; LAI, S. Z. Classification of dairy cow excretory events using a tail-mounted accelerometer. *Computer and Electronics in Agriculture* 199, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816992200504X>. Acesso em: 27 maio de 2025.
- RANGANATHAN, J. et al. How to Sustainably Feed 10 Billion People by 2050, in 21 Charts. World Resources Institute, 2018. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/how-sustainably-feed-10-billion-people-2050-21-charts>. Acesso em: 1 jun 2025.
- ZIENTARA B., solarreviews.com, 2025. How much energy does a solar panel produce?. Disponível em

<https://www.solarreviews.com/blog/how-much-electricity-does-a-solar-panel-produce>. Acesso em: 29 maio 2025.

APÊNDICE A - Tabelas com valores de entrada e saída dos testes da calculadora

Tabela 5: Valores de entrada da simulação do Teste 1

Bloco	Grandeza	Valor	Unidade de medida
Sensor	Tensão	5	V
	Corrente	4	mA
	Ciclo de trabalho	1	-
	Eficiência do regulador	100	%
Microcontrolador	Tensão	5	V
	Corrente em atividade	25	mA
	Corrente de descanso		mA
	Ciclo de trabalho	1	-
	Eficiência do regulador	100	%
Periférico 1	Tensão	5	V
	Corrente	20	mA
	Eficiência/Ciclo de trabalho	100	%
Periférico 2	Tensão	5	V
	Corrente	30	mA
	Eficiência/Ciclo de trabalho	100	%
Bateria	Capacidade Nominal	150	mAh
	Tensão	5	V
	Idade da bateria	48	meses
Ambiente	Temperatura	20	°C

Fonte: Própria, 2025

Tabela 6: Valores de saída da simulação do Teste 1

Dado	Valor	Unidade de medida
Tempo estimado de duração da bateria	80	minutos
Corrente média dos sensores	4	mA
Corrente média do microcontrolador	25	mA
Corrente média dos periféricos	50	mA
Corrente média total	79	mA
Capacidade da bateria (Otimista)	131.73	mAh
Capacidade da bateria (Típico)	118.56	mAh
Capacidade da bateria (Pessimista)	105.38	mAh

Fonte: Própria, 2025

Tabela 7: Valores de entrada da simulação do Teste 2

Bloco	Grandeza	Valor	Unidade de medida
Microcontrolador	Tensão	5	V
	Corrente em atividade	25	mA
	Corrente de descanso	5	mA
	Ciclo de trabalho	0.66	-
	Eficiência do regulador	100	%
Periférico 1	Tensão	5	V
	Corrente	40	mA
	Eficiência/Ciclo de trabalho	33	%
Ambiente	Temperatura	20	°C

Fonte: Própria, 2025

Tabela 8: Valores de saída da simulação do Teste 2

Dado	Valor	Unidade de medida
Corrente média do microcontrolador	18.2	mA
Corrente média dos periféricos	13.2	mA
Corrente média total	31.4	mA

Tabela 9: Valores de entrada da simulação do Teste 3

Bloco	Grandeza	Valor	Unidade de medida
Sensor	Tensão	5	V
	Corrente	3.9	mA
	Ciclo de trabalho	1	-
	Eficiência do regulador	100	%
Microcontrolador	Tensão	5	V
	Corrente em atividade	25	mA
	Corrente de descanso	-	mA
	Ciclo de trabalho	1	-
	Eficiência do regulador	100	%
Ambiente	Temperatura	20	°C

Fonte: Própria, 2025

Tabela 10: Valores de saída da simulação do Teste 3

Dado	Valor	Unidade de medida
Corrente média dos sensores	3.9	mA
Corrente média do microcontrolador	25	mA
Corrente média dos periféricos	0	mA
Corrente média total	28.9	mA

Fonte: Própria, 2025

Tabela 11: Valores de entrada da simulação do Teste 4

Bloco	Grandeza	Valor	Unidade de medida
Microcontrolador	Tensão	5	V
	Corrente em atividade	25	mA
	Corrente de descanso	5	mA
	Ciclo de trabalho	0.067	-
	Eficiência do regulador	100	%
Periférico 1	Tensão	5	V
	Corrente	30	mA
	Eficiência/Ciclo de trabalho	6.7	%
Periférico 2	Tensão	5	V
	Corrente	0.43	mA
	Eficiência/Ciclo de trabalho	6.7	%
Ambiente	Temperatura	20	°C

Fonte: Própria, 2025

Tabela 12: Valores de saída da simulação do Teste 4

Dado	Valor	Unidade de medida
Corrente média do microcontrolador	6.34	mA
Corrente média dos periféricos	2.04	mA
Corrente média total	8.38	mA

Fonte: Própria, 2025