



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Engenharia de Controle e Automação



Gustavo de Oliveira Moraes

Desenvolvimento de uma Estação Meteorológica Automática com Ênfase na Redução do Consumo Energético

Ouro Preto

Gustavo de Oliveira Moraes

Desenvolvimento de uma Estação Meteorológica Automática com Ênfase na Redução do Consumo Energético

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo

Ouro Preto

2026



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gustavo de Oliveira Morais

Desenvolvimento de uma Estação Meteorológica Automática com Ênfase na Redução do Consumo Energético

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 31 de julho de 2026

Membros da banca

Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profa. Dra. Livia Cristina Pinto Dias - Convidada (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)

Alan Kardek Rêgo Segundo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/08/2026



Documento assinado eletronicamente por **Alan Kardek Rego Segundo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/08/2026, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1151074** e o código CRC **984B9EDB**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008459/2026-96

SEI nº 1151074

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria para superar cada desafio ao longo desta caminhada.

À minha família, em especial aos meus pais, João Daniel e Valéria, por todo o amor, apoio, incentivo e pelos inúmeros sacrifícios realizados para que eu pudesse chegar até aqui. Aos meus irmãos, Gabriel e João Miguel, pelo companheirismo e por sempre fazerem parte da minha trajetória.

À minha namorada, Júlia Reis, que tive a felicidade de conhecer durante a graduação e com quem compartilhei toda essa jornada. Obrigado pelo carinho, pela compreensão, pelo incentivo constante e por tornar os momentos difíceis muito mais leves. Sua presença foi essencial para que essa caminhada fosse mais tranquila e significativa.

À Universidade Federal de Ouro Preto, pela formação acadêmica e pelas oportunidades proporcionadas ao longo do curso de Engenharia de Controle e Automação. Agradeço a todos os professores que contribuíram para minha formação e, de maneira especial, ao meu orientador, Alan, pela confiança, disponibilidade, orientação e pelos conhecimentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de graduação, especialmente Altamiro, Túlio, Antunes, Harrison, Scub, Pedro, Júlia Martins e Yasmin por dividirem comigo os desafios, as conquistas e os inúmeros momentos que tornaram essa caminhada muito mais leve e inesquecível.

À equipe do Labcam, pelos ensinamentos, pelo apoio e pela convivência ao longo da graduação. Em especial, ao Iuri, ao Davi e à Érica, pela disponibilidade em compartilhar conhecimentos e por toda a ajuda prestada durante esse período.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal, tornando possível a realização deste trabalho e a conclusão desta importante etapa da minha vida.

Resumo

Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento de uma estação meteorológica automática com ênfase na redução do consumo energético, visando sua aplicação em monitoramento ambiental remoto. O sistema desenvolvido realiza a aquisição de variáveis meteorológicas, a transmissão sem fio dos dados para um gateway e seu armazenamento em nuvem, permitindo o acompanhamento remoto das medições por meio de uma interface web. A estação é alimentada por um sistema fotovoltaico, possibilitando sua operação em locais sem infraestrutura elétrica. A metodologia compreendeu o desenvolvimento do hardware e do firmware, a integração dos componentes, a implementação de estratégias de gerenciamento energético e a caracterização experimental do consumo elétrico da estação. Os resultados demonstraram que a solução desenvolvida foi capaz de adquirir, transmitir, armazenar e disponibilizar remotamente os dados meteorológicos de forma confiável, alcançando uma autonomia teórica de aproximadamente 14,56 dias utilizando uma bateria de 7 Ah, sem considerar a contribuição do sistema fotovoltaico. Além disso, foi desenvolvida uma interface web para visualização em tempo real das medições e do histórico das variáveis monitoradas. Os resultados evidenciam a viabilidade técnica da solução proposta para aplicações de monitoramento ambiental remoto, fornecendo uma plataforma energeticamente eficiente e passível de expansão para diferentes aplicações em Internet das Coisas.

Palavras-chave: Estação meteorológica automática; Eficiência energética; Sistemas embarcados; Monitoramento ambiental.

Abstract

This work presents the development of an automatic weather station with an emphasis on reducing energy consumption for remote environmental monitoring applications. The developed system acquires meteorological variables, wirelessly transmits the collected data to a gateway, and stores them in the cloud, enabling remote monitoring through a web interface. The station is powered by a photovoltaic system, allowing operation in locations without access to the electrical grid. The adopted methodology comprised the development of the hardware and firmware, component integration, implementation of energy management strategies, and experimental characterization of the station's electrical consumption. The results demonstrated that the proposed solution was capable of reliably acquiring, transmitting, storing, and remotely providing meteorological data, achieving a theoretical battery life of approximately 14.56 days using a 7 Ah battery without considering the contribution of the photovoltaic system. In addition, a web-based interface was developed for real-time visualization of the measured variables and their historical records. The results demonstrate the technical feasibility of the proposed solution for remote environmental monitoring applications, providing an energy-efficient platform with the potential to be expanded for different Internet of Things applications.

Key-words: Automatic weather station; Energy efficiency; Embedded systems; Environmental monitoring.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Dispositivos com várias tensões de alimentação compartilhando o mesmo barramento. Fonte: Adaptado de NXP Semiconductors (2021).	22
Figura 2 – Condições de START e STOP no barramento I ² C. Fonte: Adaptado de NXP Semiconductors (2021).	23
Figura 3 – Transferência de dados no barramento I ² C. Fonte: Adaptado de NXP Semiconductors (2021).	23
Figura 4 – Diagrama de pinagem da LOLIN D1 mini. Fonte: WEMOS (2024)	25
Figura 5 – Diagrama de blocos interno do sensor BME280. Fonte: Adaptado de Bosch Sensortec (2024)	26
Figura 6 – Pinagem do sensor BME280 em visões superior e inferior. Fonte: Adaptado de Bosch Sensortec (2024)	26
Figura 7 – Anemômetro de copos SV10 em alumínio. Fonte: Usinainfo (s.d.[b]).	28
Figura 8 – Esquema de funcionamento interno e sensores <i>Reed Switch</i> do DV10. Fonte: Straub (2019)	29
Figura 9 – Ímã e sensor <i>reed switch</i> utilizados para detectar o basculamento do pluviômetro. Fonte:Usinainfo (s.d.[c]).	31
Figura 10 – Esquema de posicionamento do pluviômetro em relação aos obstáculos. Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2025)	31
Figura 11 – Pluviômetro de báscula digital modelo PB10. Fonte: Usinainfo (s.d.[c])	32
Figura 12 – Piranômetro Apogee SP-110 montado em base de nivelamento. Fonte: Apogee Instruments (2025)	33
Figura 13 – Bateria Estacionária Moura VRLA 12MVA-7. Fonte: Autor (2026)	34
Figura 14 – Módulo controlador de carga PWM utilizado no projeto. Fonte: O autor (2026).	36
Figura 15 – Módulo regulador de tensão MP1584. Fonte: EasyTronics (s.d.)	37
Figura 16 – Arquitetura geral da estação meteorológica automatizada, evidenciando o fluxo de dados entre os sensores, o nó sensor, o <i>gateway</i> receptor e a plataforma de armazenamento e visualização.	43
Figura 17 – Diagrama elétrico do nó sensor da estação meteorológica, apresentando as conexões entre o ESP8266, os sensores, o conversor ADS1115 e o módulo LoRa.	44
Figura 18 – Esquema simplificado do sistema de alimentação elétrica do nó sensor da estação meteorológica.	48
Figura 19 – Caixa de instrumentação contendo os circuitos eletrônicos do nó sensor. Fonte: Autor.	49
Figura 20 – Estação meteorológica desenvolvida e instalada na UFOP. Fonte: Autor.	50
Figura 21 – Medição da corrente consumida durante a etapa de aquisição dos sensores.	51
Figura 22 – Medição da corrente consumida durante a transmissão dos dados via módulo LoRa.	52

Figura 23 – Medição da corrente consumida durante o modo <i>Deep Sleep</i>	52
Figura 24 – Tela principal da interface de monitoramento desenvolvida para a estação meteorológica.	59
Figura 25 – Tela ilustrando o fluxo de aquisição, transmissão e disponibilização dos dados meteorológicos.	60
Figura 26 – Assistente virtual desenvolvido para interação com os usuários da plataforma.	61
Figura 27 – Interface de visualização histórica das medições realizadas pela estação meteorológica.	62
Figura 28 – Interface de visualização histórica da umidade.	63
Figura 29 – Interface de visualização histórica da pressão atmosférica.	64
Figura 30 – Interface de visualização histórica das medições de chuva.	65
Figura 31 – Interface de visualização histórica da velocidade média do vento.	66
Figura 32 – Interface de visualização histórica da pressão atmosférica.	67

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações técnicas da placa Wemons D1 mini. Fonte: Adaptado de WEMOS (2024)	24
Tabela 2 – Especificações técnicas do sensor ambiental BME280. Fonte: Adaptado de Bosch Sensortec (2024).	27
Tabela 3 – Especificações técnicas do anemômetro SV10. Fonte: Adaptado de Usinainfo (s.d.[b]).	28
Tabela 4 – Relação entre resistência, tensão e posição do indicador de direção do vento. Fonte: Straub (2019)	30
Tabela 5 – Especificações técnicas do pluviômetro de balança PB10. Fonte: Adaptado de Usinainfo (s.d.[c])	32
Tabela 6 – Especificações técnicas do piranômetro Apogee SP-110. Fonte: Adaptado de Apogee Instruments (2025)	34
Tabela 7 – Especificações técnicas da bateria Moura 12MVA-7. Fonte: Adaptado de Moura (2020)	35
Tabela 8 – Especificações técnicas do módulo controlador de carga PWM. Fonte: Adaptado de SOLAR... (s.d.).	36
Tabela 9 – Especificações técnicas do regulador MP1584. Fonte: Adaptado de EasyTronics (s.d.).	38
Tabela 10 – Componentes utilizados na estação meteorológica	40
Tabela 11 – Correntes medidas durante os diferentes estados de operação da estação meteorológica.	53
Tabela 12 – Resumo dos principais parâmetros energéticos obtidos para a estação meteorológica.	55

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativas e Relevância	13
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Organização e Estrutura do Trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Estações Meteorológicas	15
2.2	Baterias e estimativa de autonomia	16
2.3	Economia de Energia	18
2.4	Recomendações da Organização Meteorológica Mundial	19
2.5	Tecnologias empregadas	21
2.5.1	LoRa	21
2.5.2	I ² C	21
2.5.3	Firebase Realtime Database	23
2.6	Componentes do sistema	24
2.7	Trabalhos Relacionados	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Materiais	40
3.2	Metodologia	41
3.2.1	Etapa preliminar de simulação e validação lógica	41
3.2.2	Arquitetura geral do sistema	42
3.2.3	Seleção de componentes e barramentos	43
3.2.4	Estratégia de aquisição, processamento e transmissão dos dados	45
3.2.5	Empacotamento e transmissão dos dados	46
3.2.6	Recepção, verificação e retransmissão pelo gateway	47
3.2.7	Sistema de alimentação autônoma	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Análise do Consumo Energético	50
4.2	Estimativa de Autonomia da Bateria	54
4.3	Avaliação da metodologia de medição frente às recomendações da WMO	56
4.4	Interface de Monitoramento e Validação dos Dados	58

5 **CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 68**

Referências 70

1 Introdução

O monitoramento meteorológico desempenha um papel fundamental em diversas atividades humanas, como na agricultura, na gestão de recursos hídricos, na geração de energia, na prevenção de desastres naturais, entre outros. Por esse motivo, a observação meteorológica, que compreende a medição, o registro e a análise de variáveis capazes de representar o estado da atmosfera em um dado local e instante ([INMET, s.d.](#)), permite caracterizar as condições ambientais de uma determinada região e auxiliar na tomada de decisão em diferentes contextos, sejam eles operacionais, científicos e/ou econômicos.

No Brasil, a importância desse monitoramento torna-se evidente ao analisar os impactos associados aos eventos meteorológicos. Isso porque fenômenos como chuvas intensas, secas, ondas de calor e de frio podem gerar consequências sociais e econômicas significativas, afetando desde a população urbana até as atividades produtivas de larga escala. O relatório “Danos Sociais e Econômicos decorrentes de desastres naturais em consequência de fenômenos meteorológicos no Brasil: 2010–2019” ([SALVADOR, 2021](#)) indica que, ao longo dessa década, 1734 pessoas perderam a vida, enquanto os prejuízos econômicos ultrapassaram R\$ 307 bilhões.

A recorrência desses eventos também tem sido observada nos últimos anos. Em 2024, por exemplo, as enchentes que atingiram o estado do Rio Grande do Sul provocaram uma das maiores tragédias climáticas da história do país, afetando milhões de pessoas, comprometendo a infraestrutura urbana, interrompendo serviços essenciais e causando expressivos prejuízos sociais e econômicos ([SECRETARIA PARA APOIO À RECONSTRUÇÃO DO RIO GRANDE DO SUL, 2025](#)). Estudos recentes destacam que eventos meteorológicos extremos produzem impactos desproporcionais sobre populações mais vulneráveis, agravando problemas relacionados à pobreza, à segurança alimentar, ao acesso à água e à infraestrutura urbana ([MARENGO, 2024](#)).

Além disso, levantamentos do Instituto Nacional de Meteorologia evidenciam a persistência de eventos extremos em diferentes regiões do país, incluindo episódios de chuvas intensas e temperaturas elevadas observados ao longo de 2024 ([INMET, 2024](#)), bem como o registro dos verões de 2024 e 2025 entre os mais quentes da série histórica brasileira ([INMET, 2025](#)). Nesse contexto, a observação meteorológica torna-se uma ferramenta essencial para compreender o comportamento da atmosfera, subsidiar sistemas de alerta e apoiar atividades que dependem das condições climáticas ([INMET, s.d.](#)).

Entretanto, a eficácia desse monitoramento no Brasil é limitada pela distribuição desigual da rede de observação meteorológica, cuja densidade é insuficiente para a vasta extensão territorial do país ([BROWN et al., 2026](#)). As medições concentram-se principalmente nas regiões mais povoadas, enquanto áreas remotas, como a Bacia Amazônica, permanecem sub-representadas, apresentando a menor densidade de instrumentos do país e menos de 10% dos pluviômetros brasileiros, apesar de sua relevância para o ciclo hidrológico global ([BROWN et al., 2026](#)).

A principal infraestrutura responsável pela aquisição dessas informações é composta pelas estações meteorológicas, sistemas destinados à coleta de um ou mais elementos meteorológicos. Segundo [Valvano \(2010\)](#), sistemas desse tipo podem ser classificados como sistemas embarcados, uma vez que utilizam um microcontrolador para executar tarefas específicas e dedicadas, interagindo com o ambiente por meio de sensores e atuadores, quando necessário.

Historicamente, estações convencionais necessitavam da presença de um observador e eram frequentemente compostas por instrumentos mecânicos e de leitura direta ([BRAGA et al., 2019](#)). Com o avanço da eletrônica, as estações meteorológicas automáticas ganharam destaque, uma vez que permitem a aquisição, o armazenamento e a transmissão de dados em tempo real, com redução da intervenção humana ([BRAGA et al., 2019](#)). Apesar dessas vantagens, as estações meteorológicas convencionais permanecem relevantes para a calibração, validação e controle de qualidade das estações automáticas, além de contribuírem para a manutenção da consistência das séries históricas de dados meteorológicos ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)).

A expansão do uso de microcontroladores, sensores e módulos de comunicação sem fio flexibiliza o desenvolvimento de estações meteorológicas automáticas. Sensores modernos permitem medir diferentes variáveis ambientais, enquanto os microcontroladores integram as tarefas de aquisição, processamento, armazenamento e envio de dados. Para as estações meteorológicas, a grande disponibilidade de sensores aumenta as possibilidades de implementação desses sistemas, como exemplificado pelo uso do BMP180 para medição de pressão atmosférica e temperatura em [Lacerda Segundo e Ribeiro \(2019\)](#), e do BME280 para aferição de temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar em [Basílio \(2023\)](#). No entanto, um desafio atual constitui a operação contínua das estações em locais remotos, em função da autonomia energética.

Em aplicações afastadas da rede elétrica, é comum que a estação dependa de baterias e, em muitos casos, de painéis fotovoltaicos para manter seu funcionamento. Nessa condição, o consumo energético do microcontrolador, dos múltiplos sensores integrados e dos módulos de comunicação torna-se um fator crítico para a confiabilidade do sistema, pois consumos elevados podem reduzir a autonomia da bateria, comprometer a continuidade da coleta de dados e demandar intervenções de manutenção mais frequentes. Conforme [Urriza et al. \(2004\)](#), o processador está entre os principais responsáveis pelo consumo energético em sistemas embarcados, o que evidencia a relevância do estudo desse componente como ponto de partida para o aumento da autonomia de estações meteorológicas automáticas. Dessa forma, a adoção de estratégias de economia de energia, tanto em hardware quanto em software, mostra-se essencial para viabilizar a operação prolongada de estações meteorológicas automáticas.

Diante desse contexto, propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de uma estação meteorológica automática baseada em microcontrolador com uma autonomia de bateria que seja capaz de sustentar o pleno funcionamento do sistema.

1.1 Justificativas e Relevância

As estações meteorológicas automáticas representam ferramentas essenciais para o monitoramento ambiental contínuo, sendo sua operação ininterrupta fundamental para a qualidade dos dados coletados. No entanto, a questão energética permanece como um dos principais desafios para esses sistemas, especialmente em locais remotos onde o acesso para manutenção é difícil e a dependência de fontes autônomas de energia é crítica (HART; MARTINEZ, 2006). A interrupção do fornecimento de energia pode comprometer o funcionamento da estação e, conseqüentemente, resultar em lacunas nas séries de dados meteorológicos, dificultando sua utilização em aplicações ambientais e climáticas (CASTRO; VICHETE; LUSQUINO FILHO, 2026).

Trabalhos anteriores dos autores Basílio (2023), Leite Júnior e Gebler (2022) e Lacerda Segundo e Ribeiro (2019) demonstraram que são necessárias medidas para otimizar o consumo de energia das estações meteorológicas de forma a viabilizar sua utilização, pois, por mais que o sistema possua painéis solares, a adoção de medidas como os modos de repouso do hardware (*sleep*) pode garantir maior autonomia e até mesmo diminuir o dimensionamento dos componentes, gerando maior economia energética e financeira.

Portanto, a relevância deste trabalho reside na necessidade de maior autonomia energética para sistemas de monitoramento ambiental, visto que falhas no fornecimento de energia comprometem não apenas a coleta de dados, mas também a confiabilidade do sistema. A otimização do consumo energético permite não apenas maior longevidade dos componentes, mas também a redução de custos operacionais através do dimensionamento mais eficiente de painéis solares e bancos de baterias. Além disso, este trabalho contribui para o desenvolvimento de soluções de monitoramento ambiental mais eficientes e adequadas à operação em locais remotos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma estação meteorológica automática alimentada por bateria recarregada por energia solar, empregando estratégias de gerenciamento energético para reduzir o consumo de energia do sistema e avaliar experimentalmente sua autonomia para aplicações de monitoramento ambiental remoto.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar experimentalmente o consumo energético da estação nos diferentes estados de operação, incluindo aquisição de dados, transmissão e modo de repouso.
- Estimar a autonomia energética da estação a partir das medições experimentais de consumo e das características do sistema de alimentação fotovoltaico.

- Validar o funcionamento integrado da estação meteorológica por meio da aquisição, transmissão e armazenamento contínuo dos dados ambientais.

1.3 Organização e Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando os conceitos relacionados às estações meteorológicas automáticas, sistemas embarcados, comunicação LoRa, sistemas fotovoltaicos, gerenciamento de energia e os principais componentes utilizados no desenvolvimento da estação. O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, incluindo o desenvolvimento do hardware e do firmware, a integração entre os módulos do sistema, a implementação das estratégias de redução do consumo energético e os procedimentos experimentais. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a validação da estação meteorológica, com ênfase no desempenho do sistema, no consumo energético e na autonomia da bateria. Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho, destacando suas principais contribuições, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Estações Meteorológicas

O desenvolvimento de estações meteorológicas está diretamente relacionado ao estudo do clima e do tempo. Embora esses conceitos sejam frequentemente confundidos, é importante diferenciá-los. De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization – WMO), o clima pode ser definido como a média das condições atmosféricas de um determinado local ao longo de um extenso período de tempo, geralmente da ordem de décadas, sendo responsável por caracterizar uma região. Por outro lado, o tempo corresponde ao estado momentâneo da atmosfera e é descrito por variáveis como temperatura, precipitação, pressão atmosférica, velocidade do vento e umidade ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2018](#)).

Nesse contexto, as estações meteorológicas desempenham um papel fundamental, pois permitem o monitoramento contínuo dessas variáveis atmosféricas, fornecendo dados essenciais tanto para a caracterização das condições momentâneas do tempo quanto para estudos climáticos de longo prazo. Para isso, são equipadas com instrumentos como termômetros, anemômetros, pluviômetros, barômetros e piranômetros, responsáveis pela medição de temperatura, velocidade do vento, precipitação, pressão atmosférica e radiação solar, respectivamente ([INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL - INCAPER, s.d.](#)).

Conforme [Braga et al. \(2019\)](#), o conceito de estação meteorológica pode ser definido como o local utilizado para aferir pelo menos um dos elementos meteorológicos citados anteriormente, normalmente coletando esses dados diariamente. Esses dispositivos podem ser classificados em relação a alguns fatores como veremos a seguir, como por exemplo sua complexidade, a finalidade das observações e ao sistema de coleta de dados.

Em relação a complexidade de uma estação meteorológica, podemos dividi-las com base no número de elementos observados, onde:

- **Primeira Classe:** São estações que possuem instrumentos para medir todos os elementos meteorológicos, permitindo uma caracterização detalhada das condições climáticas locais.
- **Segunda Classe:** São estações que não medem a pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos e a irradiância solar global, mas ainda permitem uma caracterização básica das condições meteorológicas.

Já em relação a sua finalidade, temos:

- **Estações Sinópticas:** integram o sistema nacional e mundial de previsão de tempo para

a observação em horários convencionados (0:00, 6:00, 12:00, 18:00h - GMT), fornecendo envio rápido dos dados aos órgãos de previsões responsáveis.

- **Estações de Monitoramento Agrometeorológico:** Têm como propósito a obtenção de informações meteorológicas essenciais para apoiar as atividades agrícolas, incluindo observações específicas como a medição da temperatura do solo e taxa de evaporação.
- **Postos Hidrometeorológicos:** Estes postos têm a finalidade de coletar dados sobre precipitação pluviométrica, fornecendo informações cruciais para a gestão adequada dos recursos hídricos.
- **Estações de Caracterização Climática:** Possuem a finalidade de analisar e descrever o clima de uma determinada região. Algumas estações sinópticas também têm a função de caracterização climática.
- **Estações Meteorológicas Aeronáuticas:** São estabelecidas para coletar informações relevantes à segurança do transporte aéreo, sendo comumente instaladas em aeroportos.

Por fim, as estações também são divididas em relação ao seu sistema de coleta de dados:

- **Estações Meteorológicas Convencionais (EMC):** Requerem a presença diária do observador meteorológico para coleta dos dados. Os equipamentos utilizados nas EMC são geralmente de leitura direta, como termômetros, ou com sistema mecânico de registro, como termohigrógrafos, pluviógrafos, anemógrafos e actinógrafos.
- **Estações Meteorológicas Automáticas (EMA):** Possuem coleta de dados e envio das informações meteorológicas de forma automática. Estruturalmente, podem ser entendidas como um conjunto de instrumentos de medição quem funcionam vinculados à unidades de aquisição e processamento de dados. Desta forma, as informações coletadas pelos instrumentos são enviadas até uma unidade de aquisição de dados e depois são processadas, de forma remota ou local, por uma unidade de processamento. A principal vantagem é o registro contínuo de todos os elementos, com aquisição e saída dos dados em intervalos programáveis pelo usuário.

2.2 Baterias e estimativa de autonomia

Em sistemas embarcados destinados ao monitoramento ambiental em regiões remotas, a autonomia energética constitui um dos principais requisitos de projeto. Diferentemente de aplicações alimentadas diretamente pela rede elétrica, estações meteorológicas autônomas dependem exclusivamente da energia armazenada em baterias e da capacidade do sistema fotovoltaico em repor a energia consumida durante a operação. Dessa forma, o correto dimensionamento do banco de baterias torna-se essencial para garantir a continuidade da aquisição de dados,

especialmente durante períodos de baixa irradiância, dias consecutivos de chuva ou falhas temporárias no sistema de geração fotovoltaica (MESSENGER; VENTRE, 2000).

Segundo Messenger e Ventre (2000), o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos deve considerar simultaneamente a demanda energética da carga, a capacidade de geração do painel solar e a capacidade de armazenamento do banco de baterias. Os autores destacam que a bateria exerce papel fundamental na estabilidade do sistema, sendo responsável por fornecer energia sempre que a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos é insuficiente para suprir a carga. Além disso, recomenda-se que o dimensionamento considere uma margem de segurança capaz de evitar descargas profundas frequentes, condição que reduz significativamente a vida útil das baterias, principalmente aquelas baseadas em chumbo-ácido.

De forma complementar, Masters (2013) ressaltam que sistemas fotovoltaicos isolados devem ser projetados considerando não apenas o consumo médio da carga, mas também fatores como eficiência dos conversores eletrônicos, perdas associadas ao processo de carga e descarga das baterias e a profundidade máxima de descarga. Segundo o autor, a limitação da profundidade de descarga representa uma prática amplamente adotada em projetos fotovoltaicos por aumentar a durabilidade do banco de baterias e garantir maior confiabilidade operacional ao sistema, justificando a adoção de fatores de utilização inferiores à capacidade nominal do acumulador.

Além do correto dimensionamento do sistema de armazenamento, a estimativa da autonomia constitui uma importante ferramenta para avaliar a viabilidade energética de sistemas embarcados de baixo consumo. Em sua forma mais simples, essa estimativa pode ser obtida pela razão entre a capacidade útil disponível na bateria e a corrente média consumida pelo sistema ao longo de seu ciclo operacional. Essa abordagem é amplamente utilizada na análise preliminar de sistemas alimentados por bateria e fornece uma estimativa consistente do tempo de operação na ausência de recarga, desde que o perfil de consumo do equipamento seja conhecido (MASTERS, 2013).

Conforme apresentado por Masters (2013), a autonomia teórica de sistemas alimentados por bateria pode ser estimada a partir da relação entre a capacidade útil disponível e a corrente média consumida pela carga durante seu ciclo de operação, conforme expresso na Equação 4.10.

$$T = \frac{C_{\text{útil}}}{I_{\text{média}}} \quad (2.1)$$

em que:

- T representa a autonomia teórica do sistema (h);
- $C_{\text{útil}}$ corresponde à capacidade útil da bateria (Ah), considerando o limite de profundidade de descarga adotado;
- $I_{\text{média}}$ representa a corrente média equivalente consumida pelo sistema ao longo de um ciclo completo de operação (A).

Assim, considerando a capacidade útil disponível na bateria e a corrente média equivalente obtida experimentalmente, torna-se possível estimar a autonomia teórica do sistema em condições de operação contínua. Essa metodologia permite avaliar a viabilidade da arquitetura proposta antes mesmo da implantação definitiva em campo, constituindo um importante indicador do desempenho energético da estação meteorológica e servindo como base para a análise dos resultados experimentais apresentada no Capítulo 4. Essa abordagem encontra respaldo tanto na literatura de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos quanto nas metodologias empregadas para análise energética de sistemas embarcados de baixo consumo ([MESSENGER; VENTRE, 2000](#)).

2.3 Economia de Energia

Em sistemas embarcados modernos, a corrente consumida não permanece constante ao longo do tempo. Dispositivos destinados ao monitoramento ambiental normalmente alternam entre estados de aquisição de dados, processamento, transmissão das informações e modos de baixo consumo, fazendo com que a corrente média equivalente seja obtida por meio da ponderação do consumo em cada estado operacional. Conforme discutido por [Yick, Mukherjee e Ghosal \(2008\)](#), estratégias baseadas em redução do ciclo ativo (*duty cycle*) e utilização de modos de economia de energia permitem reduzir significativamente o consumo médio sem comprometer a qualidade das medições, aumentando diretamente a autonomia dos sistemas alimentados por bateria.

Dessa forma, a otimização do consumo energético em sistemas autônomos, como estações meteorológicas, é um desafio crítico, especialmente em locais remotos onde a recarga de baterias é limitada. Diversas estratégias buscam reduzir o consumo aumentando a autonomia do sistema, como as propostas por [Salehi e Eslamnour \(2021\)](#), que demonstraram que a combinação de técnicas de agrupamento inteligente de sensores e algoritmos de aprendizado por reforço pôde reduzir o consumo energético em até 31% em seu sistema.

Ademais, técnicas de *sleep mode* (modo de repouso) são estratégias comumente utilizadas para reduzir o consumo energético em sistemas de operação contínua, como é o caso das estações meteorológicas automáticas. Esse princípio consiste em desligar componentes eletrônicos quando ociosos, mantendo apenas funções críticas ativas, ou seja, o sistema alterna entre estados de alta atividade, como tarefas de leituras e transmissão de dados, e repouso (*sleep*), onde sensores, microcontroladores ou módulos de comunicação são desativados de forma parcial ou total.

Nesse contexto, [Mclaughlin et al. \(2011\)](#), demonstraram a eficiência do modo de repouso em períodos previsíveis de baixa atividade, onde alcançou-se uma economia de 56,25% observada em seu estudo de estações de rádio-base. Tal solução mostra-se compatível com o caso de estações meteorológicas, onde em condições ambientais estáveis o sistema pode controlar o desligamento dos sensores não essenciais durante alguns períodos e entrar em modo *sleep*.

Portanto, surgem as seguintes alternativas para serem aplicadas às estações meteo-

rológicas:

- Modos de *sleep* dinâmico: Desligar sensores e secundários quando não essenciais e colocar o sistema em repouso.
- Priorização de transmissões: Priorizar o envio de dados críticos em intervalos otimizados, reduzindo o gasto com comunicação.
- Escolha de hardwares eficientes: Seleção de microcontroladores de baixo consumo, seguindo o que foi destacado por [Urriza et al. \(2004\)](#).

Com a adoção dessas abordagens, em conjunto com o uso de energias renováveis, como os painéis solares, espera-se que seja prolongada, de forma significativa, a autonomia das estações.

2.4 Recomendações da Organização Meteorológica Mundial

A Organização Meteorológica Mundial (do inglês *World Meteorological Organization* – WMO) estabelece diretrizes internacionais para a realização de observações meteorológicas, visando garantir que os dados obtidos por diferentes estações apresentem confiabilidade, rastreabilidade e comparabilidade. Essas recomendações são consolidadas no *Guide to Instruments and Methods of Observation* (WMO-No. 8), documento que define critérios relacionados à seleção dos sensores, instalação dos instrumentos, procedimentos de calibração, frequência de amostragem, processamento dos dados e requisitos mínimos de desempenho para as principais variáveis meteorológicas ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)). Embora muitas dessas recomendações tenham sido desenvolvidas para redes meteorológicas oficiais, seus princípios também constituem referência para o desenvolvimento e avaliação de estações meteorológicas automáticas de baixo custo.

A adoção de procedimentos padronizados torna possível reduzir erros sistemáticos associados ao posicionamento inadequado dos sensores, à influência de obstáculos, à incidência de radiação solar, à ventilação insuficiente e a outros fatores ambientais que podem comprometer a qualidade das medições. Dessa forma, além da seleção adequada dos instrumentos, a correta instalação e o processamento dos dados desempenham papel igualmente importante para que os valores registrados representem fielmente as condições atmosféricas observadas ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)).

No caso da temperatura do ar e da umidade relativa, a WMO recomenda que os sensores sejam instalados entre 1,25 m e 2,0 m acima do nível do solo, preferencialmente sobre superfície natural coberta por vegetação baixa e protegidos da radiação solar direta por meio de abrigo meteorológico adequadamente ventilado ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)). Essas recomendações têm como objetivo minimizar o aquecimento do sensor provocado pela incidência direta de radiação e reduzir a influência do solo nas medições, permitindo que os valores obtidos representem as propriedades da massa de ar circundante. Além disso, o guia

recomenda a utilização de sensores de elevada estabilidade metrológica, calibração periódica e resolução compatível com a aplicação, de modo a garantir a rastreabilidade das medições ao longo do tempo.

Para a pressão atmosférica, a WMO recomenda a utilização de barômetros eletrônicos devidamente compensados em temperatura e instalados em compartimentos protegidos contra radiação solar direta, vibrações mecânicas e efeitos da pressão dinâmica causada pelo vento ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)). O guia também enfatiza a importância da calibração periódica do sensor e da utilização de procedimentos de correção quando os dados forem destinados à comparação com redes meteorológicas ou aplicações sinóticas, assegurando que as medições apresentem precisão e estabilidade compatíveis com os padrões internacionais.

A radiação solar global deve ser medida por meio de piranômetros instalados em superfície perfeitamente nivelada e com horizonte livre de obstáculos que possam provocar sombreamento ao longo do dia ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)). O documento destaca ainda que a limpeza periódica da superfície óptica do sensor e sua calibração são fatores fundamentais para manter a qualidade das medições, uma vez que poeira, umidade e outros contaminantes podem introduzir erros significativos nos valores registrados. Para aplicações de maior precisão, recomenda-se a utilização de sensores baseados em termopilhas, embora sensores fotovoltaicos de silício sejam amplamente empregados em aplicações de monitoramento ambiental e pesquisa devido ao seu menor custo e simplicidade de integração.

As medições de precipitação devem ser realizadas utilizando pluviômetros instalados em locais nivelados, afastados de obstáculos que possam alterar o escoamento do vento sobre a boca coletora e provocar subestimativas da chuva acumulada ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)). A altura de instalação deve permitir o correto escoamento da água até o mecanismo de medição, sendo igualmente importante a realização de inspeções periódicas para evitar obstruções causadas por folhas, poeira ou outros materiais. O guia destaca ainda que os efeitos aerodinâmicos provocados pelo vento constituem uma das principais fontes de incerteza na medição da precipitação.

Para a velocidade e a direção do vento, a WMO recomenda que os sensores sejam instalados, sempre que possível, a 10 m acima do nível do solo em áreas abertas e suficientemente afastadas de edificações, árvores ou outros obstáculos capazes de alterar o escoamento do ar ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)). A velocidade do vento deve ser obtida a partir de médias calculadas sobre intervalos de tempo definidos, enquanto as rajadas devem ser determinadas considerando janelas de curta duração. Já a direção do vento deve ser processada por meio de média vetorial, evitando erros associados à descontinuidade angular entre 0° e 360°. Essas recomendações contribuem para que as medições representem adequadamente o comportamento do vento e permaneçam comparáveis às observações realizadas por estações meteorológicas de referência.

2.5 Tecnologias empregadas

Nesta seção, apresentam-se as principais tecnologias utilizadas neste trabalho, abordando a LoRa, utilizada para a transmissão de dados de longo alcance e baixo consumo de energia; o protocolo de comunicação I²C, empregado na interface entre o microcontrolador e os sensores; e o Firebase Realtime Database, responsável pelo armazenamento e sincronização dos dados em tempo real.

2.5.1 LoRa

A tecnologia LoRa (*Long Range*) representa a camada física de redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), sendo caracterizada pelo longo alcance de comunicação e pelo baixo consumo de energia. O protocolo LoRaWAN, por sua vez, define a camada de controle de acesso ao meio e a arquitetura da rede sobre a tecnologia LoRa ([LORA ALLIANCE, 2020](#)). Originalmente desenvolvida pela Cycleo e posteriormente adquirida pela Semtech, a tecnologia LoRa é padronizada pela LoRa Alliance para suportar aplicações de Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things* – IoT), possibilitando a comunicação em longas distâncias com alta eficiência energética ([MONTAGNY, 2022](#)). Neste trabalho, foi utilizada apenas a tecnologia LoRa para a comunicação sem fio entre os módulos do sistema, não sendo empregada a arquitetura LoRaWAN.

Na camada física, o principal diferencial do LoRa é a utilização da modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Essa técnica modula o sinal por meio de pulsos de frequência que variam linearmente ao longo do tempo (*chirps*), conferindo maior robustez contra interferências e o efeito Doppler ([MONTAGNY, 2022](#)). Além disso, o desempenho da transmissão pode ser ajustado por meio de parâmetros técnicos, como a largura de banda (*Bandwidth* – BW), o fator de espalhamento (*Spreading Factor* – SF) e a taxa de codificação (*Coding Rate* – CR), permitindo adaptar a comunicação conforme os requisitos de alcance, taxa de transmissão e confiabilidade do sistema ([LORA ALLIANCE, 2025](#)).

Por fim, a segurança é implementada via criptografia AES de 128 bits em duas camadas: a chave de sessão de rede (NwkSKey) garante a integridade das mensagens e a autenticação no servidor, enquanto a chave de sessão de aplicação (AppSKey) protege a privacidade dos dados do usuário final ([LORA ALLIANCE, 2020](#)).

2.5.2 I²C

O protocolo *Inter-Integrated Circuit* (I²C) foi desenvolvido pela NXP Semiconductors no início da década de 1980 como um barramento serial bidirecional de dois fios destinado à comunicação entre circuitos integrados ([NXP SEMICONDUCTORS, 2021](#)). Segundo [Irazabal e Blozis \(2003\)](#), o I²C tornou-se um padrão mundial adotado pelos principais fabricantes de semicondutores, sendo amplamente utilizado em aplicações de controle e manutenção de baixa

velocidade. Complementarmente, [Vahid e Givargis \(1999\)](#) o classificam como um dos protocolos de comunicação mais comuns e importantes em sistemas embarcados modernos.

A interface física do barramento utiliza apenas duas linhas de sinal: a linha de dados seriais (*Serial Data* – SDA) e a linha de relógio serial (*Serial Clock* – SCL) ([NXP SEMICONDUCTORS, 2021](#)). Ambas são conectadas à tensão de alimentação por meio de resistores de *pull-up*, cujos valores típicos variam entre 2 k Ω e 10 k Ω ([IRAZABAL; BLOZIS, 2003](#)). Os dispositivos conectados ao barramento utilizam saídas do tipo dreno aberto ou coletor aberto para implementar a lógica *wired-AND* ([NXP SEMICONDUCTORS, 2021](#)). Segundo [Valvano \(2014\)](#), essa arquitetura simples torna o I²C especialmente adequado para a interface com periféricos de baixa velocidade. A Figura 1 apresenta a configuração típica do barramento conectando dispositivos com diferentes tensões de alimentação.

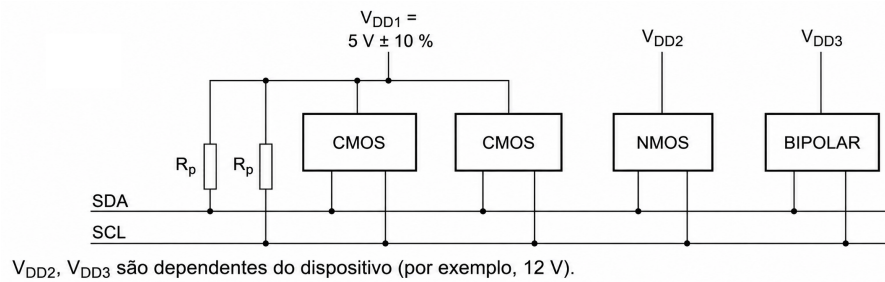


Figura 1 – Dispositivos com várias tensões de alimentação compartilhando o mesmo barramento. Fonte: Adaptado de [NXP Semiconductors \(2021\)](#).

A comunicação no I²C baseia-se em endereçamento por *software*, eliminando a necessidade de decodificadores de endereço e linhas individuais de seleção de *chip* ([NXP SEMICONDUCTORS, 2021](#)). As transferências ocorrem entre um controlador, responsável por iniciar a comunicação e gerar o sinal de relógio, e um dispositivo alvo ([IRAZABAL; BLOZIS, 2003](#)). Essa organização simplifica o projeto do sistema ao integrar periféricos diretamente ao barramento, reduzindo a carga de processamento do microcontrolador principal ([VAHID; GIVARGIS, 1999](#)).

Cada transferência inicia-se com uma condição de *START* (S), seguida pelo endereço do dispositivo alvo e pelo bit de direção (*Read/Write* – R/W). Os dados são transmitidos em bytes, cada um seguido por um bit de reconhecimento (*Acknowledge* – ACK), e a comunicação é encerrada com uma condição de *STOP* (P) ([NXP SEMICONDUCTORS, 2021](#)). As condições de *START* e *STOP* são caracterizadas por transições na linha SDA enquanto a linha SCL permanece em nível alto, conforme ilustrado na Figura 2 ([IRAZABAL; BLOZIS, 2003](#)). A sequência completa de uma transferência é apresentada na Figura 3.

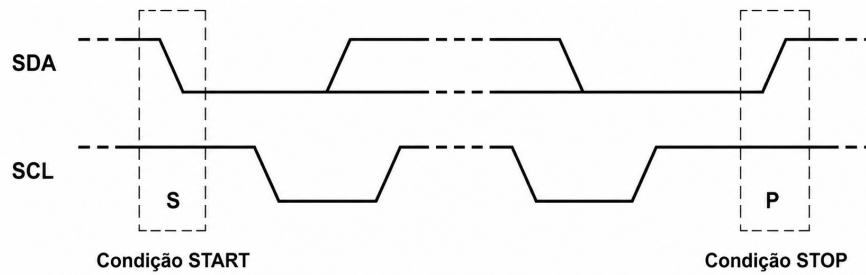


Figura 2 – Condições de START e STOP no barramento I²C. Fonte: Adaptado de [NXP Semiconductors \(2021\)](#).

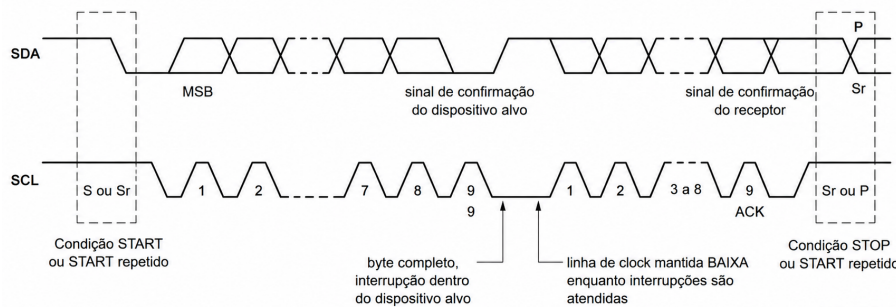


Figura 3 – Transferência de dados no barramento I²C. Fonte: Adaptado de [NXP Semiconductors \(2021\)](#).

O barramento suporta diferentes velocidades de operação, desde o modo padrão (até 100 kbit/s) até o modo de alta velocidade (até 3,4 Mbit/s) ([NXP SEMICONDUCTORS, 2021](#)). Sua ampla adoção fez com que o I²C se tornasse o principal padrão de comunicação entre sensores e microcontroladores, permitindo o reaproveitamento de bibliotecas de *software* e circuitos integrados comerciais sem modificações complexas ([NODA; SHINODA, 2018](#)). Essa padronização contribui para aumentar a produtividade no desenvolvimento de sistemas embarcados, conforme destacado por [Vahid e Givargis \(1999\)](#). Nesse contexto, pesquisas recentes continuam explorando formas de aprimorar o protocolo. Por exemplo, [K. et al. \(2026\)](#) desenvolveram um controlador I²C com foco em baixo consumo de energia, desativando o sinal de relógio de módulos ociosos, o que resultou em redução significativa do consumo de potência e da área de silício.

2.5.3 Firebase Realtime Database

O Firebase Realtime Database ([GOOGLE, 2026](#)) é uma plataforma de desenvolvimento da Google que oferece um banco de dados NoSQL hospedado na nuvem, onde os dados são armazenados no formato JSON. A principal característica dessa plataforma é a capacidade de sincronização em tempo real, o que permite que todos os clientes conectados recebam atualizações quase instantâneas sempre que ocorrer uma alteração nos dados. Essa funcionalidade elimina a necessidade de solicitações HTTP comuns para a atualização de estado, o que torna o Firebase adequado para aplicações colaborativas e que sejam de monitoramento contínuo ([GOOGLE, 2026](#)).

Além disso, o sistema oferece suporte nativo para operação *offline*. Por meio dos kits de desenvolvimento de software (SDKs), os dados são mantidos localmente no disco do dispositivo, permitindo que o aplicativo continue em atuação caso perca conectividade. Assim que a conexão é restabelecida, o dispositivo sincroniza as alterações locais com o estado atual do servidor, o que resolve conflitos de dados de forma automática (GOOGLE, 2026). Para garantir a integridade e proteção das informações, o Firebase utiliza uma linguagem de regras baseada em expressões que define quem possui permissão de leitura ou escrita (GOOGLE, 2026).

No contexto do monitoramento ambiental, Hasib e Akib (2026) desenvolveram um sistema de IoT habilitado para nuvem que utiliza o Firebase para a sincronização dos dados de sensores. O estudo demonstra que a integração do banco de dados com microcontroladores permite o gerenciamento eficiente de parâmetros como temperatura e umidade.

2.6 Componentes do sistema

Wemos D1 Mini

A placa Wemos D1 mini (ou LOLIN D1 mini) é uma plataforma de desenvolvimento compacta e de baixo custo amplamente utilizada em projetos de IoT. Historicamente, a placa tornou-se popular sob a nome WeMos, mas atualmente a fabricante utiliza a marca LOLIN. Conforme detalhado por WEMOS (2024), a versão atual da placa (V4.0.0) apresenta um formato reduzido e especificações técnicas otimizadas para aplicações integradas, as quais são detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações técnicas da placa Wemons D1 mini. Fonte: Adaptado de WEMOS (2024)

Característica	Especificação
Tensão de Operação	3,3 V
Pinos de E/S Digital	11
Pinos de Entrada Analógica	1 (Máx. 3,2 V)
Velocidade de Clock	80/160 MHz
Memória Flash	4 MB
Dimensões	34,2 x 25,6 mm
Peso	3 g

O núcleo de processamento é baseado no SoC ESP8266EX da Espressif Systems. Espressif Systems (2025) descrevem que este chip integra um processador Tensilica L106 de 32 bits, capaz de operar com frequências de 80 MHz a 160 MHz, além de oferecer conectividade Wi-Fi integral. Na Figura 4, apresenta-se o diagrama de pinagem da placa, fundamental para o interfaceamento de periféricos. Um ponto de destaque é que o protocolo de comunicação I²C está disponível e é amplamente suportado. Além disso, quase todos os pinos de I/O digital dessa placa permitem funções de interrupção, PWM, I²C e *one-wire*, com exceção do pino D0 (WEMOS, 2024).

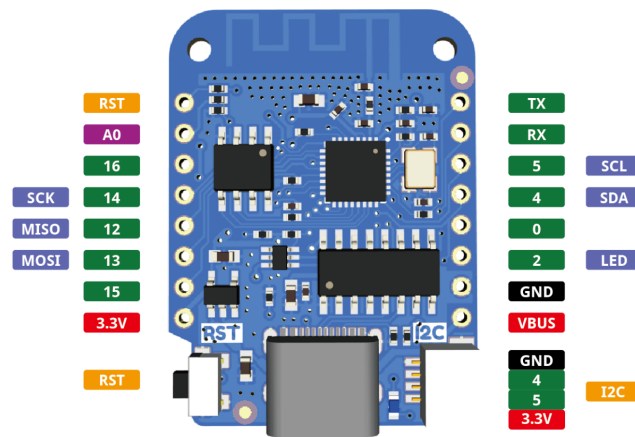


Figura 4 – Diagrama de pinagem da LOLIN D1 mini. Fonte: [WEMOS \(2024\)](#)

Quanto ao consumo energético, o projeto tira proveito dos recursos de gerenciamento de energia do chip ESP8266EX, presente na placa Wemos D1 mini. Entre esses recursos destaca-se o modo *deep sleep*, no qual o consumo de corrente do ESP8266EX pode ser reduzido para aproximadamente $20\ \mu\text{A}$ ([ESPRESSIF SYSTEMS, 2025](#)), valor que se refere exclusivamente ao chip e não aos demais componentes da placa de desenvolvimento. Essa característica, aliada ao suporte nativo para protocolos seriais e à facilidade de programação em ambientes como o Arduino, torna a D1 mini uma solução versátil para sistemas embarcados ([WEMOS, 2024](#)).

Sensor BME280

[Bosch Sensortec \(2024\)](#) desenvolveram o BME280 como um sensor ambiental digital integrado, em dimensões reduzidas, projetado especificamente para atender a requisitos de baixo consumo de energia. O dispositivo é capaz de realizar medições simultâneas de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica. Segundo [Ada et al. \(2025\)](#), a alta precisão e o baixo custo tornam este componente uma solução ideal para o monitoramento meteorológico.

O princípio de funcionamento do BME280 fundamenta-se em tecnologias distintas para cada grandeza monitorada ([BOSCH SENSORTEC, 2024](#)). Para a medição da pressão atmosférica, o dispositivo utiliza um sensor de pressão absoluta baseado em princípios de detecção comprovados pela indústria. A umidade é medida por meio de um sensor que oferece uma resposta extremamente rápida para aplicações de consciência de contexto. Complementarmente, o sensor de temperatura integrado é utilizado para a compensação térmica das medições de pressão e umidade. De acordo com [Ada et al. \(2025\)](#), essa compensação é fundamental para garantir a precisão dos dados finais mesmo em condições ambientais variáveis. Na Figura 5, apresenta-se o diagrama de blocos interno que detalha a arquitetura do sensor.

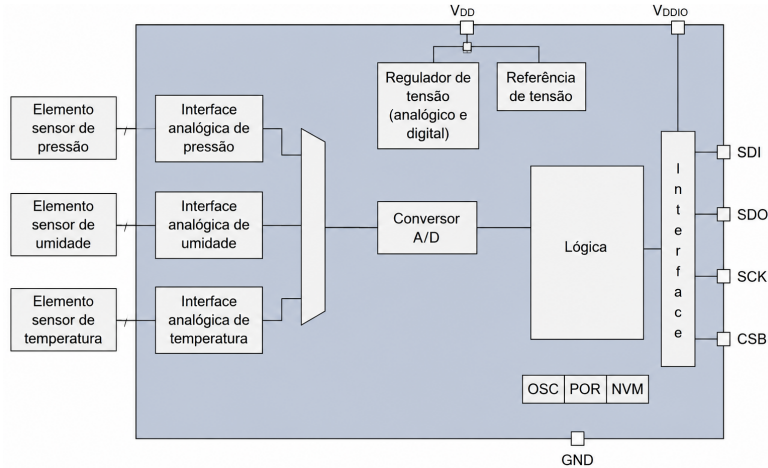


Figura 5 – Diagrama de blocos interno do sensor BME280. Fonte: Adaptado de [Bosch Sensortec \(2024\)](#)

Na Figura 6, apresenta-se o diagrama de pinagem do sensor, destacando a localização do marcador do pino 1 e do orifício de ventilação, que deve ser mantido desobstruído para garantir a precisão das leituras de pressão e umidade ([BOSCH SENSORTEC, 2024](#)).

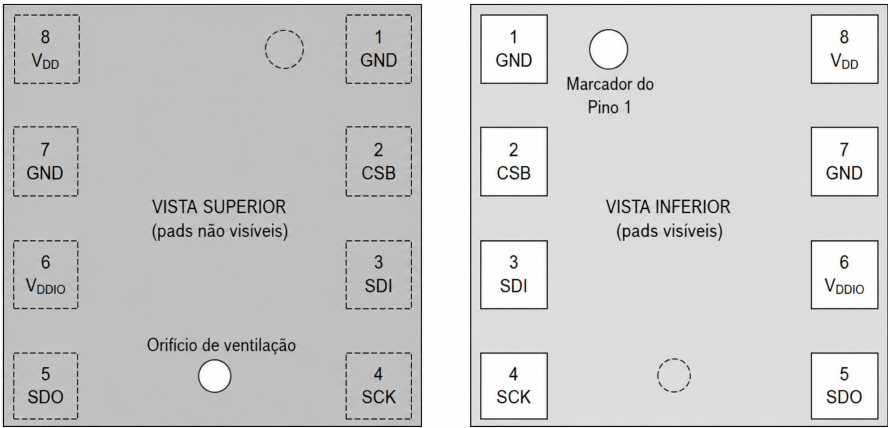


Figura 6 – Pinagem do sensor BME280 em visões superior e inferior. Fonte: Adaptado de [Bosch Sensortec \(2024\)](#)

As principais especificações elétricas e faixas de operação do sensor estão sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações técnicas do sensor ambiental BME280. Fonte: Adaptado de [Bosch Sensortec \(2024\)](#).

Característica	Especificação
Tensão de Operação (VDD)	1,71 V a 3,6 V
Interface de Comunicação	I ² C (até 3,4 MHz) e SPI (até 10 MHz)
Consumo de Corrente (Sono)	0,1 μ A
Consumo de Corrente (P, U e T)	3,6 μ A @ 1 Hz
Faixa de Temperatura de Operação	-40 a +85 °C
Faixa de Umidade de Operação	0 a 100% RH
Faixa de Pressão de Operação	300 a 1100 hPa
Dimensões do Pacote	2,5 × 2,5 × 0,93 mm

Anemômetro de copos SV10

O anemômetro SV10 é um sensor de velocidade do vento do tipo copo (*cup anemometer*), projetado para integração com plataformas de prototipagem e sistemas embarcados, como Arduino e Raspberry Pi ([USINAINFO, s.d.\[b\]](#)). Sua estrutura é composta por três copos confeccionados em alumínio de alta resistência, material que proporciona maior durabilidade e resistência às intempéries quando comparado a sensores fabricados em plástico.

De acordo com a [World Meteorological Organization \(2024\)](#), a medição da velocidade do vento deve ser realizada em locais representativos de áreas abertas, preferencialmente com o sensor instalado a uma altura padrão de 10 metros acima do nível do solo, minimizando a influência de obstáculos próximos. Por ser simples e robusto, o anemômetro SV10 é amplamente empregado em estações meteorológicas automáticas, aplicações agrícolas, monitoramento ambiental e sistemas de automação.

O princípio de funcionamento do SV10 baseia-se na conversão da energia cinética do vento em pulsos elétricos digitais. Quando o vento incide sobre os três copos do rotor, é produzido um torque que provoca a rotação do eixo central. Esse eixo é sustentado por rolamentos selados de baixo atrito, permitindo que o sensor detecte velocidades de vento a partir de aproximadamente 0,9 km/h ([USINAINFO, s.d.\[b\]](#)).

Internamente, o sensor utiliza um interruptor magnético do tipo *reed switch*, responsável por gerar pulsos elétricos proporcionais à velocidade de rotação do conjunto ([USINAINFO, s.d.\[b\]](#)). Segundo a [World Meteorological Organization \(2024\)](#), em anemômetros de copos devidamente projetados, a velocidade angular do rotor apresenta comportamento aproximadamente linear em relação à velocidade do vento, característica que simplifica o processo de calibração e reduz a influência da densidade do ar sobre a medição.

Durante a aquisição de dados, os pulsos produzidos pelo *reed switch* são contabilizados pela entrada digital do microcontrolador, sendo posteriormente convertidos em velocidade do vento por meio de uma constante de calibração fornecida pelo fabricante ou obtida experimentalmente. Na Figura 7, apresenta-se o aspecto físico do anemômetro SV10.



Figura 7 – Anemômetro de copos SV10 em alumínio. Fonte: [Usinainfo](#) (s.d.[b]).

As especificações técnicas do SV10 evidenciam sua adequação para aplicações em sistemas embarcados e estações meteorológicas. A Tabela 3 apresenta as principais características do sensor.

Tabela 3 – Especificações técnicas do anemômetro SV10. Fonte: Adaptado de [Usinainfo](#) (s.d.[b]).

Característica	Especificação
Modelo	SV10
Material	Alumínio
Tensão de trabalho	5 V DC
Tipo de sinal	Digital (<i>Reed Switch</i>)
Medição máxima	120 km/h
Sensibilidade inicial	0,9 km/h (0,25 m/s)
Temperatura de trabalho	−40 °C a 80 °C
Comprimento do cabo	Aproximadamente 5 m
Peso	330 g

Além da determinação da velocidade média do vento, recomenda-se a utilização do desvio padrão para caracterizar a variabilidade temporal da velocidade do vento e quantificar a intensidade das rajadas (**wmo2024**). O desvio padrão da velocidade do vento é calculado por:

$$s_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n u_i\right)^2}{n}}{n}} \quad (2.2)$$

em que:

- u_i representa a velocidade do vento na i -ésima amostra;
- n corresponde ao número total de amostras coletadas;
- s_u representa o desvio padrão da velocidade do vento.

A aplicação dessa métrica permite distinguir condições de vento relativamente constantes de situações caracterizadas por elevada turbulência, sendo amplamente empregada na análise de séries temporais de dados meteorológicos ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)).

Indicador de direção do vento DV10

O Indicador de Direção do Vento DV10 é um dispositivo projetado para monitorar o deslocamento das massas de ar em relação à superfície terrestre, identificando a origem do vento com base em áreas de diferentes pressões ([STRAUB, 2019](#)). Conforme destacado por [Usinainfo \(s.d.\[a\]\)](#), este equipamento é frequentemente comercializado de forma integrada ao anemômetro de copos SV10, compondo um conjunto completo para estações meteorológicas. Sua construção utiliza predominantemente o alumínio e plásticos de alta resistência, garantindo durabilidade contra intempéries e isolamento contra interferências externas.

O princípio de funcionamento do dispositivo fundamenta-se em um sistema de verificação que utiliza a variação da resistência interna para sinalizar a direção para a qual o vento sopra ([STRAUB, 2019](#)). Internamente, o DV10 abriga oito sensores magnéticos do tipo *Reed Switch* acoplados a oito resistores de 10 k Ω distribuídos de forma estratégica, como apresentado pela Figura 8. À medida que o vento desloca a pá, um ímã interno aciona esses contatos, resultando em valores de resistência e tensão distintos para cada posição geográfica ([STRAUB, 2019](#)).



Figura 8 – Esquema de funcionamento interno e sensores *Reed Switch* do DV10. Fonte: [Straub \(2019\)](#)

Essa configuração física permite distinguir oito direções principais, conforme detalhado na Tabela 4, que apresenta a relação entre a direção e os ângulos correspondentes ao utilizar um resistor externo de 4,7 k Ω , recomendado pelo fabricante para a calibração do sinal analógico.

Tabela 4 – Relação entre resistência, tensão e posição do indicador de direção do vento. Fonte: [Straub \(2019\)](#)

Resistência (Ω)	Tensão (V)	Posição do Indicador
10 k Ω	1,59	0° - N
20 k Ω	0,94	45° - NE
30 k Ω	0,66	90° - L
40 k Ω	0,51	135° - SE
50 k Ω	0,42	180° - S
60 k Ω	0,35	225° - SO
70 k Ω	0,30	270° - O
80 k Ω	0,26	315° - NO

Pluviômetro de Bâscula PB10

O pluviômetro de báscula é um instrumento mecânico-eletrônico projetado para a mensuração digital e contínua da precipitação pluviométrica ([USINAINFO, s.d.\[c\]](#)). Diferente dos modelos convencionais que exigem leitura manual, esse dispositivo permite o registro de eventos pluviométricos extremos e a integração com sistemas de telemetria em tempo real. Segundo a [Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico \(2025\)](#), esse modelo é o que vem sendo empregado rotineiramente na operação das estações pluviométricas automáticas de sua responsabilidade, o que justifica sua escolha para projetos que buscam confiabilidade e automação.

O princípio de funcionamento dos pluviômetros de báscula baseia-se em um mecanismo interno de basculagem, popularmente chamado de “gangorra”. A água da chuva é captada por um funil coletor e direcionada para um dos compartimentos da báscula. Nesse caso, ao atingir um volume pré-determinado, equivalente a uma lâmina de água de 0,25 mm no modelo utilizado, o peso da água faz com que a báscula tombe, esvaziando o compartimento cheio enquanto o outro passa a receber a água da chuva ([USINAINFO, s.d.\[c\]](#)). Durante esse movimento de inclinação, um sensor presente no equipamento, geralmente um *reed switch*, emite um pulso digital que pode ser interpretado diretamente por microcontroladores ([USINAINFO, s.d.\[c\]](#)).

A Figura 9 ilustra o mecanismo interno responsável pela detecção do movimento da báscula. Observa-se o ímã acoplado à estrutura móvel e o sensor *reed switch*, que gera um pulso elétrico a cada basculamento, permitindo ao microcontrolador contabilizar o volume de precipitação acumulado.

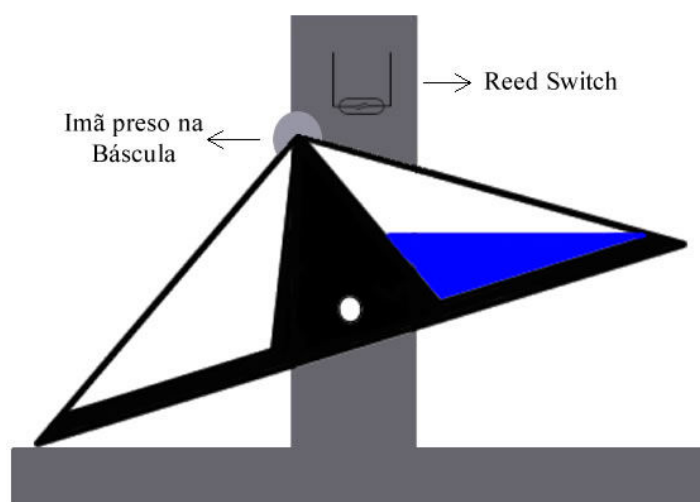


Figura 9 – Ímã e sensor *reed switch* utilizados para detectar o basculamento do pluviômetro. Fonte: [Usinainfo](#) (s.d.[c]).

Na Figura 10, apresenta-se o esquema de posicionamento ideal para garantir que o fluxo de ar e a captação não sejam obstruídos por obstáculos próximos. As diretrizes técnicas recomendam que o dispositivo seja fixado em terreno plano e livre de obstáculos, preferencialmente a uma altura de 1,5 metros em relação ao solo ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2025](#)). Esta altura é recomendada para minimizar o efeito de respingos do chão e garantir que os dados coletados sejam comparáveis aos de estações localizadas nas proximidades ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2025](#)). Além disso, o instrumento deve estar perfeitamente nivelado para que a basculagem interna ocorra corretamente, evitando erros de medição causados por desalinhamentos ([USINAINFO, s.d.\[c\]](#)).

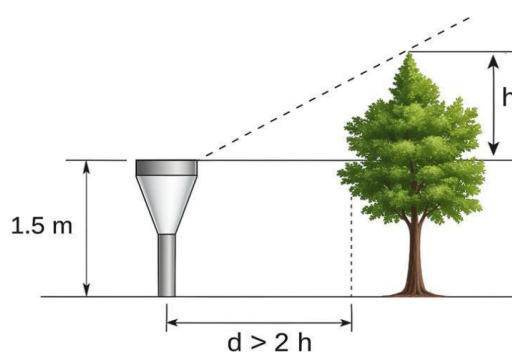


Figura 10 – Esquema de posicionamento do pluviômetro em relação aos obstáculos. Fonte: [Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico \(2025\)](#)

Para a implementação deste projeto, utilizou-se o modelo PB10, construído inteiramente em alumínio para garantir alta durabilidade e resistência a intempéries climáticas ([USINAINFO, s.d.\[c\]](#)). Na Figura 11, observa-se o design do sensor PB10, que acompanha suporte e braçadeiras para facilitar a fixação em campo.



Figura 11 – Pluviômetro de báscula digital modelo PB10. Fonte: [Usinainfo](#) (s.d.[c])

As especificações técnicas detalhadas deste modelo estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas do pluviômetro de báscula PB10. Fonte: Adaptado de [Usinainfo](#) (s.d.[c])

Característica	Especificação
Modelo	PB10
Material	Alumínio
Tensão de Operação	3 a 30 VDC
Tipo	Digital
Leitura	a cada 0,25 mm
Diâmetro do Coletor	~147 mm
Erro Máximo	4% (até 30 mm/h), 5% (até 50 mm/h), 7% (até 90 mm/h)
Comprimento do cabo	~2 m
Dimensões (Ax D)	160 x 150 mm (sem suporte)
Peso	555 g

Piranômetro SP-110

O piranômetro SP-110, fabricado pela Apogee Instruments, é um sensor analógico do tipo *unamplified* (não amplificado) e *self-powered* (sem necessidade de alimentação externa), desenvolvido para a medição da radiação de ondas curtas ([APOGEE INSTRUMENTS, 2026b](#)). Como detalhado por [Apogee Instruments \(2025\)](#), este dispositivo é amplamente aplicado em redes meteorológicas agrícolas, ecológicas e hidrológicas, além de ser uma ferramenta essencial para a otimização de sistemas fotovoltaicos. Na Figura 15, apresenta-se a aparência física do sensor em uma base de nivelamento.



Figura 12 – Piranômetro Apogee SP-110 montado em base de nivelamento. Fonte: [Apogee Instruments \(2025\)](#)

O funcionamento do SP-110 baseia-se em um fotodiodo de silício que atua como detector de radiação. Conforme explicado em [Apogee Instruments \(2026a\)](#), embora a radiação solar total na superfície terrestre abranja comprimentos de onda de 280 a 4000 nm , os sensores de célula de silício são sensíveis apenas a uma fração desse espectro, operando aproximadamente entre 350 e 1100 nm . Apesar dessa limitação espectral, o dispositivo é calibrado para estimar a radiação total de ondas curtas por meio da comparação com piranômetros padrão de referência sob condições de céu limpo.

A resposta do sensor é um sinal de tensão analógico diretamente proporcional à radiação incidente em uma superfície plana, emanada de todos os ângulos de um hemisfério. Para a obtenção do valor da irradiância em Watts por metro quadrado ($W \cdot m^{-2}$), utiliza-se um fator de calibração padrão derivado da sensibilidade do sensor ([APOGEE INSTRUMENTS, 2025](#)). A conversão é realizada pela seguinte formulação matemática:

$$E_g = F_{cal} \cdot V_{out} \quad (2.3)$$

Onde E_g é a irradiância global de ondas curtas ($W \cdot m^{-2}$), V_{out} é o sinal de saída em milivolts (mV) e F_{cal} é o fator de calibração, estabelecido em exatamente 5,0 $W \cdot m^{-2}$ por mV para este modelo.

O modelo SP-110 é classificado como um piranômetro de Classe C (resposta rápida) de acordo com a norma ISO 9060:2018 ([APOGEE INSTRUMENTS, 2026a](#)). Suas especificações garantem alta repetibilidade e estabilidade a longo prazo, conforme sintetizado na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações técnicas do piranômetro Apogee SP-110. Fonte: Adaptado de [Apogee Instruments \(2025\)](#)

Característica	Especificação
Fonte de Energia	Self-powered (Autoalimentado)
Faixa de Saída Calibrada	0 a 400 mV
Sensibilidade	0,2 mV por $W \cdot m^{-2}$
Incerteza de Calibração	< 3% (a $1000 W \cdot m^{-2}$)
Tempo de Resposta	< 1 ms
Faixa Espectral	360 a 1120 nm
Campo de Visão (FOV)	180°
Ambiente de Operação	-40 a 70 °C; 0 a 100% UR
Dimensões	24 mm de diâmetro, 33 mm de altura
Massa	90 g (com 5 m de cabo)

Bateria

A bateria utilizada neste projeto é o modelo 12MVA-7 da fabricante Moura. Conforme destaca [Energy Shop \(s.d.\)](#), este componente é projetado para oferecer alta segurança, confiabilidade e autonomia em aplicações que exigem descarga profunda e excelente aceitação de carga. Na Figura 13, apresenta-se a bateria empregada no sistema.



Figura 13 – Bateria Estacionária Moura VRLA 12MVA-7. Fonte: Autor (2026)

O princípio de funcionamento deste modelo baseia-se na regulação por válvulas, as quais controlam automaticamente a pressão interna dos gases, impedindo a emissão de vapores nocivos e permitindo que o dispositivo seja utilizado em ambientes com circulação de pessoas ([ENERGY SHOP, s.d.](#)). Além disso, a bateria utiliza separadores de lã de vidro do tipo AGM (*Absorbent Glass Mat*), que garantem a retenção do eletrólito e eliminam problemas relacionados à estratificação, permitindo inclusive a instalação em diversas posições ([MOURA, 2020](#)).

Em termos construtivos, o dispositivo possui um conjunto plástico em ABS de alta resistência contra impactos e grades robustas desenvolvidas com uma liga especial de chumbo para restringir a corrosão ([ENERGY SHOP, s.d.](#)). De acordo com [Moura \(2020\)](#), o modelo apresenta uma baixa taxa de autodescarga, tipicamente menor ou igual a 3% ao mês em temperatura de 25°C. As principais especificações técnicas da bateria utilizada estão detalhadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Especificações técnicas da bateria Moura 12MVA-7. Fonte: Adaptado de [Moura \(2020\)](#)

Característica	Especificação
Tensão Nominal	12 V
Capacidade Nominal (C20)	7,00 Ah
Máxima Corrente de Carga	2,1 A
Corrente de Curto-Circuito	190 A
Resistência Interna	23 mΩ (em flutuação a 25 °C)
Dimensões (CxLxA)	151 x 66 x 99 mm
Peso	2,15 kg

[Energy Shop \(s.d.\)](#) reforça ainda que a vida útil projetada para este modelo em regime de flutuação é superior a 4 anos, dispensando manutenções preventivas durante sua operação regular.

Módulo Controlador de Carga PWM

O controlador de carga é um dos principais componentes de sistemas fotovoltaicos isolados, sendo responsável pelo gerenciamento do fluxo de energia entre o módulo fotovoltaico e o banco de baterias. Sua principal função é garantir que o carregamento da bateria ocorra dentro de limites seguros de tensão e corrente, protegendo-a contra condições como sobrecarga e descarga excessiva, que podem reduzir sua vida útil ([MESSENGER; VENTRE, 2000](#)).

Entre as tecnologias empregadas nesses dispositivos, destaca-se a Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM), amplamente utilizada em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte devido à sua simplicidade, baixo custo e elevada confiabilidade. Nesse método, o controlador regula a corrente média de carregamento por meio da modulação da largura dos pulsos aplicados à bateria. À medida que a bateria se aproxima de sua carga completa, o controlador reduz gradualmente o tempo de condução dos pulsos, limitando a corrente de carga e evitando sobrecargas. Esse processo permite a realização do carregamento em múltiplos estágios, contribuindo para a redução do estresse térmico e químico das células e, conseqüentemente, para o aumento da vida útil da bateria ([MORNINGSTAR, s.d.](#)).

O controlador de carga utilizado neste trabalho, apresentado na Figura 14, é um módulo PWM comercial de aplicação genérica, baseado em microcontrolador para o gerenciamento automático do processo de carregamento. Conforme descrito no manual do equipamento, o dispositivo realiza a identificação automática da tensão nominal do sistema (12 V ou 24 V), possui compensação de temperatura para otimização do carregamento e incorpora proteções eletrônicas contra curto-circuito, inversão de polaridade, sobrecarga e descarga excessiva da bateria ([SOLAR... , s.d.](#)).



Figura 14 – Módulo controlador de carga PWM utilizado no projeto. Fonte: O autor (2026).

O controlador dispõe de terminais específicos para conexão do módulo fotovoltaico, do banco de baterias e da carga em corrente contínua (CC), realizando automaticamente o gerenciamento da energia entre esses elementos. No sistema desenvolvido, esse componente é responsável por controlar o carregamento da bateria alimentada pelo painel fotovoltaico, o que favorece uma alimentação estável e segura para os demais dispositivos eletrônicos empregados na estação meteorológica.

As principais especificações técnicas do controlador utilizado, extraídas do manual do fabricante, são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Especificações técnicas do módulo controlador de carga PWM. Fonte: Adaptado de SOLAR... (s.d.).

Característica	Especificação
Tensão nominal do sistema	12 V / 24 V
Corrente nominal de carga	5 A / 10 A / 15 A / 20 A / 30 A (conforme o modelo)
Máxima tensão de entrada do painel	≤ 46 V
Método de carregamento	PWM
Queda de tensão no circuito de carga	$\leq 0,20$ V
Faixa de temperatura de operação	-35°C a $+65^{\circ}\text{C}$
Proteções incorporadas	Sobrecarga, sobredescarga, curto-circuito e inversão de polaridade
Compensação de temperatura	Sim

Regulador de tensão MP1584

O MP1584 é um regulador de tensão chaveado do tipo *buck* (*step-down*), desenvolvido para converter tensões contínuas mais elevadas em níveis inferiores com elevada eficiência. O dispositivo integra um MOSFET de potência interno, sendo um componente adequado para aplicações embarcadas, sistemas industriais e equipamentos alimentados por baterias, nos quais

a eficiência energética e as dimensões reduzidas são fatores importantes ([MONOLITHIC POWER SYSTEMS, 2011](#); [EASYTRONICS, s.d.](#)).



Figura 15 – Módulo regulador de tensão MP1584. Fonte: [EasyTronics \(s.d.\)](#)

No desenvolvimento da estação meteorológica, o MP1584 foi empregado para fornecer uma alimentação estável de 3,3 V aos dispositivos eletrônicos do sistema, garantindo compatibilidade com o microcontrolador e com os sensores utilizados. A utilização de um conversor chaveado em substituição a reguladores lineares contribui significativamente para a redução das perdas por dissipação térmica, o que aumenta a autonomia do sistema, que é alimentado por bateria ([MONOLITHIC POWER SYSTEMS, 2011](#)).

Outro aspecto relevante para a aplicação é sua elevada eficiência de conversão, que pode atingir aproximadamente 92%, além da baixa corrente consumida em repouso (ou quiescente), de aproximadamente 100 μA . Em condições de baixa carga, o regulador reduz automaticamente a frequência efetiva de chaveamento por meio do modo *Pulse Skipping*, diminuindo as perdas de comutação e contribuindo para um menor consumo energético, característica que é importante em estações meteorológicas autônomas ([EASYTRONICS, s.d.](#)).

O controle interno do MP1584 é baseado em modo de corrente, o que proporciona uma resposta dinâmica rápida às variações de carga, bem como estabilidade durante a regulação da tensão de saída. Esse dispositivo também incorpora recursos de proteção, como bloqueio por subtensão, partida suave, (*soft-start*) para limitar correntes durante a inicialização, e proteção contra sobretemperatura, aumentando a confiabilidade da operação em aplicações contínuas ([MONOLITHIC POWER SYSTEMS, 2011](#)).

A tensão de saída é definida por meio de um divisor resistivo conectado ao pino de realimentação (*Feedback* – FB), conforme apresentado na Equação 2.4.

$$V_{OUT} = V_{FB} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2.4)$$

em que V_{FB} corresponde à tensão de referência interna do circuito, e R_1 e R_2 representam

os resistores do divisor de tensão responsável pela configuração da saída ([MONOLITHIC POWER SYSTEMS, 2011](#)).

As principais especificações técnicas do módulo empregado no projeto são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Especificações técnicas do regulador MP1584. Fonte: Adaptado de [EasyTronics \(s.d.\)](#).

Característica	Especificação
Tensão de Entrada	4,5 V a 28 V
Tensão de Saída	0,8 V a 20 V
Corrente Máxima de Saída	3 A
Eficiência Máxima	92%
Frequência Máxima de Comutação	1,5 MHz
Consumo de Corrente em Repouso	100 μ A
Temperatura de Operação	-20 °C a +85 °C
Dimensões (CxLxA)	22 × 17 × 4 mm

2.7 Trabalhos Relacionados

Estudos recentes contemplam a redução do consumo energético em sistemas embarcados. [Santos \(2016\)](#) desenvolveu um sistema de monitoramento de colmeias e utilizou uma miniestação climática para controlar o período do intervalo de leituras dos instrumentos, a fim de diminuir o consumo de energia do circuito principal, uma vez que, quanto maior o intervalo de tempo entre leituras, menor é o consumo energético do sistema. Em [Leite Júnior e Gebler \(2022\)](#), avaliaram-se diferentes baterias em uma microestação meteorológica, com o intuito de verificar o desempenho de cada uma delas em diferentes intervalos de coleta de dados.

[Basílio \(2023\)](#) avançou nessa linha ao desenvolver uma estação meteorológica inteligente voltada para a Agricultura 4.0, integrando sensores de diversas variáveis climáticas para o cálculo da evapotranspiração de referência. O autor utilizou tecnologias de comunicação de longo alcance e baixo consumo, como LoRa e MQTT e realizou um detalhado orçamento energético do sistema. O estudo demonstrou que, embora o reabastecimento via painéis fotovoltaicos garanta a continuidade operacional, a autonomia da bateria em períodos de ausência solar é um fator crítico. Sendo assim, ele ressaltou que o uso de modos de repouso profundo (*deep sleep*) é essencial para estender a vida útil do dispositivo para aproximadamente um ano, o que permite a operação em locais remotos, mantendo a alta confiabilidade.

[Vega-Gonzalez e Ramírez-Beltrán \(2022\)](#) propuseram um modelo de energia orientado a funções para análise de nós de sensores de baixa potência. Os autores tiveram como objetivo a criação de uma metodologia que permitisse comparações justas entre diferentes dispositivos, focando em blocos funcionais em vez de apenas módulos de hardware independentes. Eles concluíram que essa abordagem baseada em funções fornece valores mais práticos para o design de sistemas, destacando que estratégias como o uso de Acesso Direto à Memória, o aumento da frequência de clock e o armazenamento de dados em cartões SD sem sistema de arquivos

contribuem significativamente para a economia de energia.

Em uma revisão mais ampla, [Khalifeh et al. \(2022\)](#) avaliaram diversas plataformas de nós sensores baseadas em microcontroladores, comparando soluções acadêmicas recentes com plataformas comerciais. O objetivo principal foi compreender a trajetória de desenvolvimento dessas tecnologias para orientar a criação de nós autônomos e energeticamente eficientes. A revisão concluiu que, embora o consumo de energia continue sendo o maior desafio para a vida útil das redes de sensores, a tendência atual foca no desenvolvimento de microcontroladores com consumo ultra-baixo em modo de repouso (“*sleep*”), integração de técnicas de colheita de energia (“*energy harvesting*”) e o uso de tecnologias de comunicação de longo alcance e baixa potência.

[Sofianidis, Konstantakos e Nikolaidis \(2025\)](#) exploraram o uso de Escalonamento Dinâmico de Tensão e Frequência (DVFS) para reduzir o consumo em aplicações de IoT. O objetivo dos autores foi categorizar as tarefas conforme suas demandas temporais para otimizar a relação entre velocidade e eficiência energética. Eles concluíram que a estratégia ideal depende do tipo de função: para tarefas de processamento, deve-se utilizar a menor tensão de alimentação possível combinada com a maior frequência de clock que ela suporte para minimizar correntes de fuga. Já para tarefas de duração fixa, como a amostragem de dados de sensores, a conclusão foi que a maior economia ocorre ao operar na menor frequência e tensão capazes de sustentar a execução da função.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo, apresentam-se os materiais utilizados e a metodologia de implementação da estação meteorológica automática.

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento da estação meteorológica automática, utilizaram-se os componentes apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Componentes utilizados na estação meteorológica

Componente do sistema	Função
Wemos D1 Mini (ESP8266EX)	Processamento e transmissão dos dados
Sensor BME280	Medição de temperatura, umidade e pressão
Anemômetro SV10	Medição da velocidade do vento
Sensor Direção do Vento DV10	Indicação da direção do vento
Pluviômetro de balança PB10	Coleta e quantificação da chuva
Piranômetro SP-110	Medição de radiação solar
Módulo LoRa E220-900t22d	Comunicação de longa distância
Bateria Moura 12MVA-7	Alimentação do sistema
Módulo controlador de carga PWM	Controle da carga da bateria
Placa solar Komaes KM(P)5	Geração de energia elétrica a partir da radiação solar
Regulador de Tensão MP1584	Estabilizar a tensão de alimentação para 3,3 V

A seleção dos componentes empregados neste trabalho foi realizada considerando critérios de funcionalidade, baixo consumo energético, facilidade de integração, disponibilidade comercial e adequação aos objetivos propostos para uma estação meteorológica autônoma destinada ao monitoramento ambiental remoto.

O microcontrolador ESP8266, embarcado na placa Wemos D1 Mini, foi escolhido por reunir capacidade de processamento, comunicação Wi-Fi integrada e ampla disponibilidade de bibliotecas para desenvolvimento de sistemas embarcados. Além disso, o dispositivo possui suporte ao modo *Deep Sleep*, característica fundamental para a implementação das estratégias de gerenciamento energético propostas neste trabalho.

Para a aquisição das variáveis ambientais, optou-se pelo sensor BME280 devido à sua capacidade de medir temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica utilizando um único dispositivo. Essa característica reduz a quantidade de componentes necessários, simplifica o circuito eletrônico e contribui para a diminuição das dimensões da placa e do consumo energético do sistema. Além disso, suas especificações de faixa de medição e exatidão atendem aos requisitos recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) para essas variáveis.

As medições de velocidade e direção do vento foram realizadas utilizando os sensores SV10 e DV10, enquanto a precipitação foi obtida por meio do pluviômetro de báscula PB10 e a irradiância solar pelo piranômetro SP-110. Esses sensores foram selecionados por serem amplamente empregados em aplicações meteorológicas, apresentarem construção robusta para operação em ambiente externo e fornecerem medições compatíveis com as necessidades do sistema desenvolvido.

A comunicação entre o nó sensor e o gateway foi implementada utilizando o módulo LoRa E220-900T22D. A escolha dessa tecnologia deve-se ao seu longo alcance de comunicação aliado ao baixo consumo de energia, características que a tornam especialmente adequada para aplicações de monitoramento remoto alimentadas por bateria, nas quais a autonomia energética constitui um requisito fundamental.

O sistema de alimentação foi concebido para permitir a operação autônoma da estação em locais sem acesso à rede elétrica. Para isso, foi empregada uma bateria chumbo-ácido VRLA-AGM, recarregada por um painel fotovoltaico através de um controlador de carga PWM. Essa configuração garante o armazenamento da energia gerada durante o dia e sua utilização nos períodos de baixa irradiância ou durante a noite. Complementarmente, utilizou-se o regulador buck MP1584 para fornecer uma tensão estável de 3,3 V aos circuitos eletrônicos, aumentando a eficiência energética do sistema em comparação com reguladores lineares.

3.2 Metodologia

O desenvolvimento da estação meteorológica automatizada foi conduzido por meio de uma metodologia sistemática, fundamentada nos princípios da instrumentação eletrônica, dos sistemas embarcados, da comunicação sem fio de longo alcance e da eficiência energética, com o objetivo de projetar uma solução capaz de realizar o monitoramento contínuo de variáveis meteorológicas utilizando uma fonte de alimentação autônoma baseada em energia solar. Todo o processo de desenvolvimento foi orientado pela premissa de minimizar o consumo energético do sistema sem comprometer a confiabilidade das medições, a estabilidade da comunicação e a disponibilidade das informações para monitoramento remoto. Para isso, adotou-se uma abordagem incremental, na qual os componentes de hardware e de software foram inicialmente validados de forma individual e, posteriormente, integrados até a obtenção de um sistema embarcado completo e funcional.

3.2.1 Etapa preliminar de simulação e validação lógica

Antes da implementação do hardware definitivo, a lógica de aquisição e transmissão de dados foi validada em ambiente simulado, etapa originada em disciplina eletiva de microcontroladores cursada durante o 2º semestre de 2025, anterior ao desenvolvimento do hardware final. Nessa fase, utilizou-se o emulador de tempo real *PICSimLab*, configurado com uma placa ESP32 — em substituição ao ESP8266, não suportado nativamente pelo simulador —, na qual

potenciômetros e um botão físico simulavam, respectivamente, os sensores de temperatura e umidade e o pluviômetro. Os dados simulados eram estruturados no formato *JSON* e transmitidos via protocolo MQTT a um fluxo desenvolvido na ferramenta *Node-RED*, responsável por armazená-los em um banco de dados SQLite local e por exibi-los em painéis de supervisão. Essa etapa cumpriu o papel de validar, de forma isolada e de baixo custo, a lógica de aquisição periódica e a estrutura de comunicação publicador–assinante, antes da disponibilidade do hardware definitivo e dos sensores físicos.

É importante ressaltar que essa arquitetura de simulação — baseada em MQTT, Node-RED e SQLite — não corresponde à arquitetura efetivamente implementada na versão final da estação. O sistema definitivo, descrito nas seções seguintes, emprega comunicação via rádio LoRa entre o nó sensor e o gateway, e armazenamento em nuvem por meio do Firebase Realtime Database, conforme detalhado na Seção 3.2.6.

3.2.2 Arquitetura geral do sistema

A arquitetura definitiva da estação meteorológica foi organizada em dois nós baseados no microcontrolador ESP8266 (Wemos D1 Mini), com funções complementares e assimétricas do ponto de vista energético: um nó sensor, instalado em campo e alimentado por um sistema fotovoltaico isolado, e um *gateway* receptor, permanentemente conectado à rede elétrica e à Internet.

A Figura 16 apresenta a arquitetura completa do sistema, evidenciando o fluxo de aquisição, processamento, transmissão e armazenamento dos dados meteorológicos. No nó sensor concentram-se a aquisição das variáveis ambientais, o processamento local dos dados e a transmissão das informações por meio da comunicação LoRa. O *gateway* receptor, por sua vez, recebe os pacotes transmitidos via rádio, estabelece a conexão com a rede Wi-Fi e realiza o envio das informações para o banco de dados em nuvem, permitindo posteriormente sua visualização por meio da plataforma Firebase.

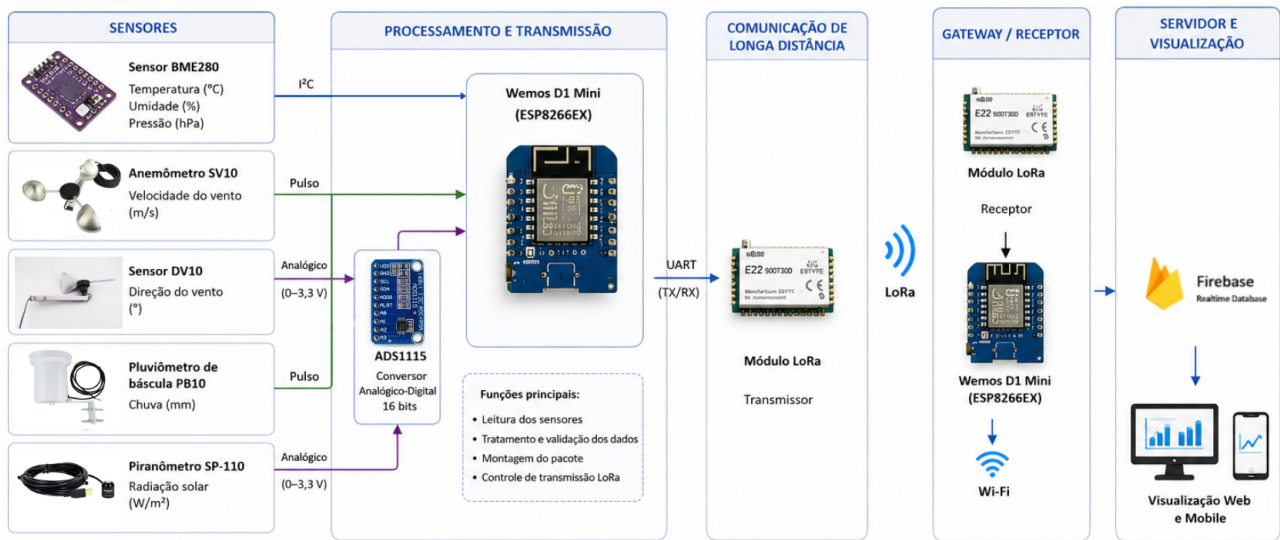


Figura 16 – Arquitetura geral da estação meteorológica automatizada, evidenciando o fluxo de dados entre os sensores, o nó sensor, o *gateway* receptor e a plataforma de armazenamento e visualização.

A separação das responsabilidades entre os dois nós constitui a principal decisão de projeto adotada para reduzir o consumo energético da estação. As tarefas de maior demanda computacional e energética, como a manutenção de uma conexão Wi-Fi ativa, o processo de autenticação e o envio contínuo de dados para o banco de dados em nuvem, foram deliberadamente concentradas no *gateway*, que permanece permanentemente energizado. Em contrapartida, o nó sensor permanece dedicado exclusivamente à aquisição das variáveis meteorológicas, ao processamento local das medições e à transmissão periódica dos dados via LoRa, reduzindo significativamente o tempo em que o microcontrolador permanece em estado ativo.

3.2.3 Seleção de componentes e barramentos

O microcontrolador escolhido para compor o núcleo de processamento de ambos os nós foi o ESP8266, embarcado na placa Wemos D1 Mini. A escolha desse dispositivo fundamentou-se na ampla disponibilidade de bibliotecas para aquisição de dados, no suporte nativo a modos de baixo consumo — em particular o *Deep Sleep* — e na facilidade de integração com os protocolos empregados no projeto. Buscou-se, ainda, adotar uma arquitetura eletrônica simples e robusta, concentrando os dispositivos digitais em um único barramento sempre que possível, de modo a reduzir a quantidade de componentes ativos e simplificar tanto o desenvolvimento do *firmware* quanto futuras atividades de manutenção.

A configuração final do nó sensor e as conexões entre os dispositivos são apresentadas no diagrama elétrico da Figura 17. O esquemático evidencia os barramentos de comunicação, as entradas analógicas e digitais utilizadas, bem como a distribuição dos sinais entre os sensores, o microcontrolador e o módulo de comunicação LoRa.

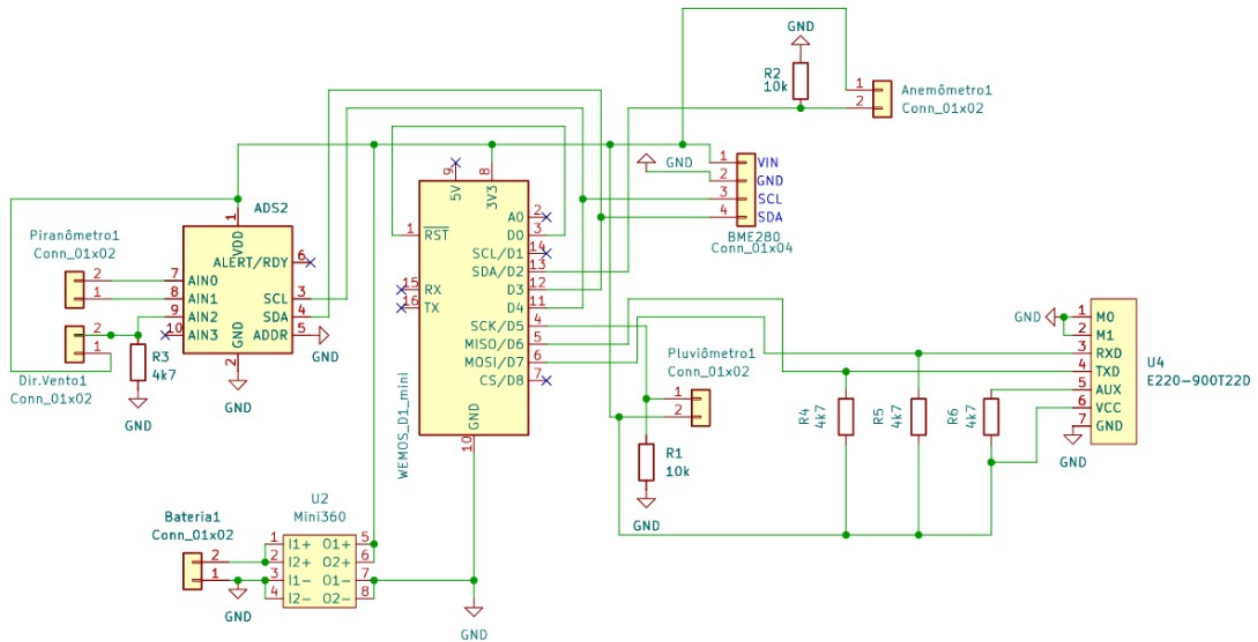


Figura 17 – Diagrama elétrico do nó sensor da estação meteorológica, apresentando as conexões entre o ESP8266, os sensores, o conversor ADS1115 e o módulo LoRa.

A disposição de pinos do nó sensor passou por uma revisão em relação às versões iniciais do hardware, motivada pela observação de falhas de funcionamento após períodos prolongados de operação contínua. Na configuração final, ilustrada na Figura 17, o barramento I²C foi remanejado para os pinos de *boot* da placa (SDA em D3/GPIO0 e SCL em D4/GPIO2), aproveitando o fato de esses pinos já possuírem resistores de *pull-up* físicos embutidos nos módulos BME280 e ADS1115, o que contribui para a inicialização estável do microcontrolador.

Ao barramento I²C estão conectados o sensor ambiental BME280 e o conversor analógico-digital externo ADS1115 de 16 bits. O uso do ADS1115 permitiu superar as limitações do conversor analógico interno do ESP8266, sendo empregado na leitura do piranômetro SP-110, conectado às entradas diferenciais A0 e A1, e do sensor de direção do vento DV10, conectado à entrada A2.

Os sensores baseados em contagem de pulsos foram associados a rotinas de interrupção externa (*Interrupt Service Routine* – ISR), permitindo que o microcontrolador permaneça a maior parte do tempo em modo de baixo consumo e seja acionado apenas durante a ocorrência dos eventos. O pluviômetro de báscula PB10 foi conectado ao pino D5 (GPIO14), mantido por ser um pino seguro durante o processo de inicialização do ESP8266. Já o anemômetro de copos SV10 foi realocado para o pino D2 (GPIO4) na revisão final do hardware, garantindo maior estabilidade operacional.

A comunicação de longa distância entre o nó sensor e o *gateway* é realizada por meio do módulo LoRa, conectado ao ESP8266 através de uma porta serial por software configurada nos

pinos D6 (RX/GPIO12) e D7 (TX/GPIO13), conforme indicado na Figura 17.

A arquitetura do sistema privilegiou a simplicidade do hardware instalado em campo, optando-se por não incorporar módulo de relógio de tempo real (RTC) ou cartão SD. Dessa forma, a referência temporal e o armazenamento permanente dos dados foram delegados ao *gateway* e ao banco de dados em nuvem, reduzindo a complexidade eletrônica e o consumo energético do nó sensor.

3.2.4 Estratégia de aquisição, processamento e transmissão dos dados

O firmware do nó sensor foi desenvolvido segundo uma estratégia de operação cíclica, alternando períodos de atividade e repouso profundo (*deep sleep*), de forma a reduzir significativamente o consumo energético da estação. Diferentemente de aplicações convencionais para microcontroladores, toda a lógica de aquisição e processamento foi concentrada na função `setup()`, enquanto a função `loop()` permanece intencionalmente vazia. Essa abordagem decorre do próprio funcionamento do ESP8266, que reinicia completamente sua execução sempre que desperta do modo *deep sleep*, iniciando um novo ciclo de aquisição a partir da rotina de inicialização.

Após cada despertar, o sistema inicia uma janela de aquisição ativa com duração fixa de 120 s. Durante esse intervalo, as variáveis meteorológicas são amostradas em frequências compatíveis com sua dinâmica temporal e com as recomendações apresentadas pela Organização Meteorológica Mundial ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)). Temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa, medidas pelo sensor BME280, são adquiridas a cada 5 s, assim como a irradiância solar e a direção do vento, totalizando aproximadamente vinte e quatro subamostras de cada variável ao final da janela. Essa estratégia permite reduzir a influência de flutuações instantâneas e produzir valores médios mais representativos das condições atmosféricas observadas, assim como é sugerido pela norma mundial.

Para a velocidade do vento, o firmware adota um tratamento distinto devido à necessidade de caracterizar também as rajadas. Os pulsos provenientes do anemômetro são contabilizados continuamente por meio de interrupções externas, enquanto uma rotina periódica, executada a cada 3 s, calcula a velocidade correspondente à subjanela e atualiza o maior valor observado durante todo o ciclo ativo. Dessa forma, além da velocidade média obtida ao final da janela de aquisição, também é determinada a rajada máxima, empregando um intervalo de integração compatível com aquele recomendado pela WMO para a caracterização desse fenômeno ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)).

A direção do vento também recebe tratamento específico durante o processamento dos dados. Em vez da média aritmética dos ângulos medidos, o firmware utiliza média vetorial, acumulando separadamente as componentes seno e cosseno de cada amostra. Ao final da janela ativa, o ângulo resultante é calculado por meio da função arco-tangente e posteriormente arredondado para o múltiplo de 45° mais próximo, correspondente às oito direções cardeais e colaterais implementadas pelo sensor DV10. Essa abordagem evita inconsistências matemáticas

associadas à descontinuidade existente entre 0° e 360° , produzindo resultados mais representativos da direção predominante do vento.

A precipitação é monitorada continuamente durante toda a janela ativa utilizando interrupções geradas pelo reed switch do pluviômetro. Cada pulso válido incrementa um contador interno protegido por uma rotina de *debounce*, reduzindo a ocorrência de falsas contagens provocadas pelo efeito de repique mecânico dos contatos elétricos. Ao final do ciclo, o número total de pulsos é convertido em lâmina de precipitação acumulada por meio do fator de calibração correspondente ao equipamento utilizado.

Concluído o período de aquisição, o firmware calcula as médias aritméticas das variáveis escalares (temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa e irradiância solar), determina a velocidade média do vento a partir da contagem total de pulsos registrada durante a janela, calcula a rajada máxima e obtém a direção média vetorial. Todos os resultados são então organizados em uma estrutura no formato CSV contendo, respectivamente, temperatura, pressão, umidade, número de pulsos do pluviômetro, precipitação acumulada, velocidade média do vento, velocidade máxima de rajada, direção média e irradiância solar. Antes da transmissão, é calculado um código de verificação (*checksum*) baseado na operação XOR sobre todos os caracteres da mensagem, permitindo ao nó receptor verificar a integridade dos dados recebidos.

Após a transmissão via módulo LoRa, o microcontrolador retorna ao modo *deep sleep*, permanecendo nesse estado pelo intervalo definido em firmware antes de iniciar um novo ciclo de aquisição, conciliando a resolução temporal das medições com o consumo energético do sistema.

3.2.5 Empacotamento e transmissão dos dados

Ao final de cada ciclo de aquisição, as nove grandezas calculadas — temperatura, pressão, umidade, número de pulsos de chuva, lâmina de precipitação, velocidade média do vento, velocidade de rajada, direção do vento em graus e irradiância solar — são organizadas em uma estrutura textual no formato CSV (*Comma-Separated Values*), seguida de um caractere separador `*` e de um código de verificação de integridade calculado por meio da operação *XOR* sucessiva sobre todos os caracteres do campo de dados, representado em dois dígitos hexadecimais. A escolha do formato CSV em detrimento de estruturas mais verbosas, como o JSON empregado na etapa preliminar de simulação (Seção 3.2.1), justifica-se pela economia de bytes transmitidos: como o tempo de atividade do rádio LoRa está diretamente associado ao consumo energético do nó sensor, reduzir o tamanho do pacote — eliminando chaves, aspas e delimitadores próprios de estruturas como o JSON — contribui de forma direta para o objetivo central deste trabalho. O pacote resultante é transmitido uma única vez por ciclo, por meio de uma porta serial por software operando a 9600 bps, conectada ao módulo transceptor LoRa nos pinos D6 e D7 (GPIO12 e GPIO13, respectivamente).

Imediatamente após a transmissão, aguarda-se um intervalo curto para garantir a conclusão do envio pelo rádio antes de o microcontrolador ser colocado em modo de repouso profundo (*deep sleep*), no qual praticamente todos os circuitos internos de processamento são

desligados até o início do próximo ciclo de aquisição. Essa estratégia — concentrar todas as leituras em uma única janela ativa e realizar apenas uma transmissão por ciclo — reduz significativamente o tempo de utilização simultânea dos sensores, do processador e do rádio, componentes que respondem pelas maiores parcelas do consumo energético da estação.

3.2.6 Recepção, verificação e retransmissão pelo gateway

O gateway receptor mantém uma porta serial por software configurada para os mesmos parâmetros do transmissor e acumula os caracteres recebidos em um buffer de tamanho fixo, delimitando cada mensagem pelo caractere de nova linha. Ao identificar uma mensagem completa, o firmware localiza o separador de checksum, recalcula a verificação *XOR* sobre o campo de dados recebido e compara o resultado com o valor transmitido; mensagens cujo checksum não confere, ou que não contenham o separador esperado, são descartadas e registradas para fins de diagnóstico, sem interromper o funcionamento do sistema. Uma vez validado o pacote, os campos são extraídos na mesma ordem definida pelo nó sensor — temperatura, pressão, umidade, pulsos de chuva, lâmina de chuva, velocidade média, rajada, direção e irradiância — e convertidos de volta para seus tipos numéricos, garantindo consistência entre o que foi transmitido e o que é efetivamente armazenado.

A direção do vento, originalmente recebida em graus, é adicionalmente convertida para seu nome cardeal ou colateral correspondente antes do envio à nuvem, de modo a facilitar a interpretação dos dados em aplicações de visualização. As informações validadas são então publicadas no Firebase Realtime Database, acompanhadas de um *timestamp* obtido por sincronização NTP realizada no próprio gateway, conforme discutido na Seção 3.2.3 a respeito da opção por não empregar um módulo RTC dedicado no nó sensor.

De forma complementar, o gateway publica periodicamente, a cada 15 s, um sinal de presença (*heartbeat*) em um nó específico do banco de dados, indicando que o equipamento permanece operacional e informando o instante da última atualização. Esse mecanismo permite distinguir, do lado da aplicação de supervisão, entre a ausência de novas leituras por inatividade momentânea do nó sensor e uma eventual falha do próprio gateway, contribuindo para a confiabilidade geral do sistema de monitoramento.

3.2.7 Sistema de alimentação autônoma

Como o nó sensor é destinado à operação contínua em ambiente externo, sem disponibilidade permanente de energia elétrica, foi desenvolvido um sistema de alimentação fotovoltaico autônomo, projetado para fornecer energia de forma ininterrupta e garantir a recarga automática da bateria durante o período diurno. A arquitetura adotada é composta por um painel fotovoltaico, um controlador de carga por modulação por largura de pulso (PWM), uma bateria estacionária de chumbo-ácido selada com tecnologia VRLA-AGM e um conversor CC-CC (*step-down*) baseado no circuito integrado MP1584.

A Figura 18 apresenta o esquema simplificado do sistema de alimentação elétrica utilizado no nó sensor, evidenciando o fluxo de energia desde a geração pelo painel fotovoltaico até a alimentação dos dispositivos eletrônicos da estação.

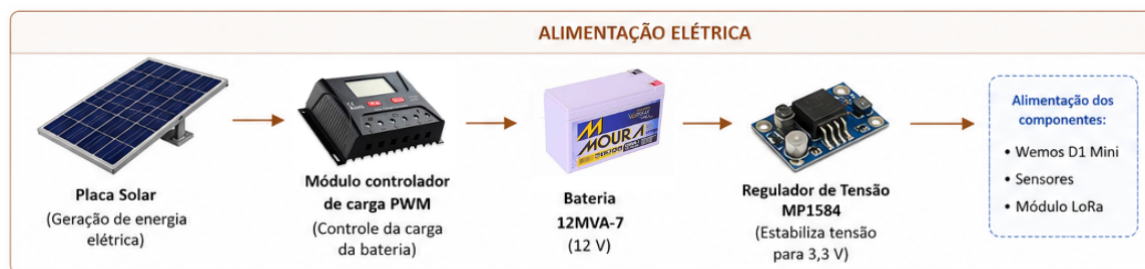


Figura 18 – Esquema simplificado do sistema de alimentação elétrica do nó sensor da estação meteorológica.

Durante o período de incidência solar, a energia gerada pelo painel fotovoltaico é encaminhada ao controlador de carga PWM, responsável por gerenciar os processos de carga e descarga da bateria, protegendo-a contra condições de sobrecarga e descarga profunda. A bateria estacionária atua como elemento de armazenamento energético, garantindo o funcionamento contínuo da estação durante períodos de baixa irradiância ou no período noturno.

A tensão nominal de 12 V fornecida pela bateria é convertida para 3,3 V por meio do conversor CC-CC MP1584, tensão necessária para alimentar o microcontrolador ESP8266, os sensores e o módulo de comunicação LoRa. Essa arquitetura de alimentação, associada às estratégias de gerenciamento energético implementadas no firmware, permite que o sistema opere de forma autônoma por longos períodos, minimizando a necessidade de intervenções de manutenção e tornando a solução adequada para aplicações de monitoramento ambiental em locais remotos.

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a validação experimental da estação meteorológica desenvolvida. A análise concentra-se principalmente no comportamento energético do sistema, uma vez que a redução do consumo de energia constitui o objetivo central deste trabalho. Além disso, são apresentados os resultados referentes à estimativa da autonomia da estação a partir das medições realizadas em bancada, permitindo avaliar a viabilidade de sua operação em ambientes remotos alimentados por energia solar.

Os ensaios experimentais foram conduzidos após a integração completa dos módulos eletrônicos, sensores e sistema de alimentação fotovoltaico, utilizando o firmware desenvolvido especificamente para a estação meteorológica. As medições de corrente foram realizadas considerando o ciclo operacional implementado no microcontrolador, permitindo caracterizar individualmente cada estado de funcionamento da estação e determinar sua influência sobre o consumo energético total.

A Figura 19 apresenta a caixa de instrumentação do nó sensor, na qual foram acondicionados o microcontrolador, o módulo de comunicação LoRa, o regulador de tensão e os demais circuitos eletrônicos responsáveis pela aquisição, processamento e transmissão dos dados meteorológicos. A utilização de uma caixa de proteção permitiu organizar os componentes eletrônicos e protegê-los contra a exposição ao ambiente durante os ensaios.

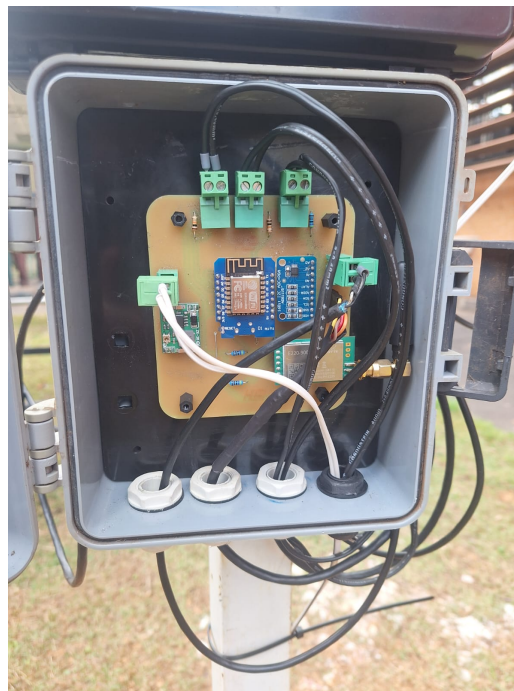


Figura 19 – Caixa de instrumentação contendo os circuitos eletrônicos do nó sensor. Fonte: Autor.

A Figura 20 apresenta a estação meteorológica completa utilizada nos ensaios experimen-

tais. Observa-se a integração entre os sensores ambientais, o nó sensor, o sistema de alimentação fotovoltaico e os módulos responsáveis pela comunicação sem fio. A arquitetura modular adotada durante o desenvolvimento facilitou tanto a montagem quanto os procedimentos de validação, permitindo que cada subsistema fosse avaliado individualmente antes da integração completa.



Figura 20 – Estação meteorológica desenvolvida e instalada na UFOP. Fonte: Autor.

A Figura 20 apresenta a estação meteorológica desenvolvida durante os ensaios experimentais. Observa-se a integração entre os sensores ambientais, a unidade de processamento, o sistema de alimentação fotovoltaico e os módulos responsáveis pela comunicação sem fio. A arquitetura modular adotada durante o desenvolvimento facilitou tanto a montagem quanto os procedimentos de validação, permitindo que cada subsistema fosse avaliado individualmente antes da integração completa.

4.1 Análise do Consumo Energético

O consumo energético representa um dos principais parâmetros para avaliação da viabilidade de sistemas embarcados destinados ao monitoramento remoto. Em aplicações alimentadas por baterias e painéis fotovoltaicos, pequenas reduções na corrente consumida podem resultar em ganhos significativos de autonomia, aumentando a disponibilidade operacional da estação e reduzindo a necessidade de intervenções para manutenção.

Conforme descrito no Capítulo 3, o firmware foi desenvolvido de forma que o funcionamento da estação fosse dividido em três estados operacionais distintos: aquisição das variáveis meteorológicas, transmissão dos dados via tecnologia LoRa e período de repouso em modo *Deep Sleep*. Essa estratégia permitiu caracterizar individualmente o consumo energético de cada etapa do ciclo de funcionamento, possibilitando avaliar quantitativamente a contribuição de cada estado para o consumo médio da estação.

Para essa caracterização, foram realizadas medições experimentais da corrente consumida durante os diferentes estados de operação utilizando um multímetro digital conectado em série com a alimentação proveniente da bateria de 12 V, posicionado na entrada do sistema de alimentação da estação. Dessa forma, foi possível mensurar o consumo total da arquitetura desenvolvida, contemplando simultaneamente o microcontrolador, sensores, regulador de tensão, módulo LoRa e demais dispositivos eletrônicos presentes no circuito.

Durante os ensaios, todas as medições foram realizadas com a estação meteorológica completamente montada, mantendo todos os sensores, módulos eletrônicos e circuitos auxiliares conectados ao sistema. Adicionalmente, durante as medições em modo ativo, os sensores baseados em pulsos (anemômetro e pluviômetro) foram acionados manualmente diversas vezes em sequência, buscando reproduzir um cenário de elevada atividade de aquisição e representar uma condição próxima ao pior caso de operação. Entretanto, verificou-se que o acionamento contínuo desses sensores provocou apenas uma variação mínima na corrente medida, indicando que sua contribuição para o consumo energético global da estação é pouco significativa quando comparada ao consumo dos demais dispositivos eletrônicos.

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam as correntes medidas durante as etapas de aquisição das variáveis meteorológicas, transmissão dos dados e repouso em modo *Deep Sleep*, respectivamente.



Figura 21 – Medição da corrente consumida durante a etapa de aquisição dos sensores.



Figura 22 – Medição da corrente consumida durante a transmissão dos dados via módulo LoRa.



Figura 23 – Medição da corrente consumida durante o modo *Deep Sleep*.

Embora durante os ensaios tenha sido medida uma corrente de aproximadamente 56,70 mA durante a transmissão, esse valor deve ser interpretado com cautela. A transmissão via rádio ocorre em intervalos muito curtos, produzindo picos instantâneos de corrente superiores à capacidade de resposta de um multímetro digital convencional, que tende a indicar um valor médio inferior ao pico efetivamente consumido.

Por esse motivo, optou-se por utilizar, na estimativa da autonomia energética, a corrente típica de transmissão especificada pelo fabricante do módulo LoRa E220-900T30D, correspondente a aproximadamente 110 mA em potência máxima de transmissão ([CHENGDU EBYTE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD., 2020](#)). Essa abordagem torna a análise conservadora, evitando a superestimação da autonomia da estação em condições reais de operação.

A Tabela 11 apresenta as correntes médias obtidas experimentalmente para cada estado operacional da estação.

Tabela 11 – Correntes medidas durante os diferentes estados de operação da estação meteorológica.

Estado operacional	Tempo	Corrente média
Aquisição das variáveis meteorológicas	120 s	19,83 mA
Transmissão dos dados via LoRa	0,5 s	56,70 mA
Repouso (<i>Deep Sleep</i>)	180 s	13,23 mA

Considerando os tempos de permanência em cada estado operacional, o período correspondente a um ciclo completo de funcionamento da estação é dado pela Equação 4.1.

$$T_{\text{ciclo}} = t_{\text{aq}} + t_{\text{tx}} + t_{\text{slp}} = 120 + 0,5 + 180 = 300,5 \text{ s} \quad (4.1)$$

A carga elétrica consumida durante um ciclo operacional pode ser determinada pela Equação 4.2.

$$C_{\text{ciclo}} = \frac{(I_{\text{aq}} \cdot t_{\text{aq}}) + (I_{\text{tx}} \cdot t_{\text{tx}}) + (I_{\text{slp}} \cdot t_{\text{slp}})}{3600} \quad (4.2)$$

Substituindo os valores experimentais das etapas de aquisição e repouso, juntamente com a corrente de transmissão especificada pelo fabricante, obtém-se

$$C_{\text{ciclo}} = \frac{(19,83 \times 120) + (110 \times 0,5) + (13,23 \times 180)}{3600} = 1,338 \text{ mAh.} \quad (4.3)$$

Como cada ciclo possui duração de 300,5 s (0,08347 h), a corrente média equivalente da estação é calculada pela Equação 4.4.

$$I_{\text{média}} = \frac{C_{\text{ciclo}}}{t_{\text{ciclo}}} = \frac{1,338}{0,08347} = 16,03 \text{ mA.} \quad (4.4)$$

Com o objetivo de avaliar quantitativamente o impacto da estratégia de gerenciamento energético adotada, foi considerado um cenário hipotético no qual a estação operaria continuamente, realizando sucessivos ciclos de aquisição e transmissão dos dados, porém sem utilizar o modo *Deep Sleep*. Nessa condição, o período total do ciclo operacional seria dado por:

$$T_{\text{ciclo, sem sleep}} = t_{\text{aq}} + t_{\text{tx}} = 120 + 0,5 = 120,5 \text{ s} \quad (4.5)$$

A carga elétrica consumida em cada ciclo seria:

$$C_{\text{ciclo, sem sleep}} = \frac{(I_{\text{aq}} \cdot t_{\text{aq}}) + (I_{\text{tx}} \cdot t_{\text{tx}})}{3600} \quad (4.6)$$

Substituindo os valores:

$$C_{\text{ciclo, sem sleep}} = \frac{(19,83 \times 120) + (110 \times 0,5)}{3600} = 0,676 \text{ mAh} \quad (4.7)$$

Como cada ciclo possui duração de 120,5 s (0,03347 h), a corrente média equivalente é dada por:

$$I_{\text{média, sem sleep}} = \frac{0,676}{0,03347} = 20,20 \text{ mA} \quad (4.8)$$

Comparando ambos os cenários, verifica-se que a utilização do modo *Deep Sleep* proporciona uma redução aproximada de 20,64% na corrente média consumida pela estação. Esse resultado demonstra que a estratégia de gerenciamento energético adotada contribui significativamente para o aumento da autonomia do sistema, uma vez que reduz o consumo médio sem alterar a metodologia de aquisição, processamento e transmissão dos dados. Dessa forma, o modo de repouso profundo constitui um dos principais fatores responsáveis pela viabilidade energética da arquitetura proposta, especialmente em aplicações alimentadas exclusivamente por bateria e energia fotovoltaica.

4.2 Estimativa de Autonomia da Bateria

A corrente média equivalente determinada na Seção anterior permite estimar a autonomia da estação meteorológica em condições de operação contínua, constituindo um importante indicador da viabilidade da arquitetura proposta para aplicações remotas alimentadas por energia solar. Para essa estimativa foi considerada a bateria selada de chumbo-ácido VRLA-AGM especificada para o projeto, com capacidade nominal de 7 Ah. Entretanto, visando preservar sua vida útil e minimizar os efeitos da descarga profunda, adotou-se como critério de dimensionamento a utilização de apenas 80% dessa capacidade, resultando em uma capacidade útil de:

$$C_{\text{útil}} = C_{\text{nominal}} \times 0,8 = 7 \times 0,8 = 5,6 \text{ Ah} \quad (4.9)$$

Considerando a corrente média equivalente obtida para a estratégia de operação proposta, igual a 16,03 mA, a autonomia teórica da estação pode ser estimada por:

$$Autonomia_{\text{horas}} = \frac{C_{\text{útil}}}{I_{\text{média}}} = \frac{5,6}{0,01603} \approx 349,34 \text{ horas} \quad (4.10)$$

Convertendo esse valor para dias de operação contínua:

$$Autonomia_{\text{dias}} = \frac{349,34}{24} \approx 14,56 \text{ dias} \quad (4.11)$$

Como forma de avaliar o impacto da estratégia de gerenciamento energético, também foi estimada a autonomia para o cenário hipotético em que a estação operaria continuamente

sem utilizar o modo *Deep Sleep*. Nessa condição, utilizando a corrente média equivalente de 20,20 mA determinada na Seção 4.1, obtém-se:

$$Autonomia_{\text{horas, sem sleep}} = \frac{5,6}{0,02020} \approx 277,23 \text{ horas} \quad (4.12)$$

$$Autonomia_{\text{dias, sem sleep}} = \frac{277,23}{24} \approx 11,55 \text{ dias} \quad (4.13)$$

A Tabela 12 apresenta um resumo dos principais parâmetros energéticos determinados durante a caracterização experimental da estação, bem como a comparação entre os cenários com e sem utilização do modo *Deep Sleep*.

Tabela 12 – Resumo dos principais parâmetros energéticos obtidos para a estação meteorológica.

Parâmetro	Valor
Corrente durante aquisição	19,83 mA
Corrente durante transmissão (medida)	56,70 mA
Corrente de transmissão (<i>datasheet</i>) adotada	110 mA
Corrente durante repouso (<i>Deep Sleep</i>)	13,23 mA
Corrente média equivalente (com <i>Deep Sleep</i>)	16,03 mA
Corrente média equivalente (sem <i>Deep Sleep</i>)	20,20 mA
Capacidade útil considerada	5,6 Ah
Autonomia estimada (com <i>Deep Sleep</i>)	349,34 h (14,56 dias)
Autonomia estimada (sem <i>Deep Sleep</i>)	277,23 h (11,55 dias)
Ganho de autonomia proporcionado pelo <i>Deep Sleep</i>	26,06%

Os resultados evidenciam que a estratégia de gerenciamento energético baseada na utilização do modo *Deep Sleep* proporciona um aumento expressivo da autonomia da estação. Comparando os dois cenários avaliados, verifica-se um acréscimo aproximado de 72 horas de operação, correspondente a cerca de 3,01 dias adicionais de funcionamento contínuo utilizando exclusivamente a energia armazenada na bateria. Em termos relativos, isso representa um ganho de aproximadamente 26,06% na autonomia do sistema.

Ressalta-se ainda que as estimativas apresentadas correspondem a um cenário conservador, uma vez que desconsideram completamente a contribuição do sistema fotovoltaico para o carregamento da bateria. Em condições reais de operação, espera-se que a energia gerada pelo painel solar durante o período diurno compense parte significativa do consumo da estação, aumentando substancialmente sua disponibilidade operacional.

Durante os ensaios experimentais também foi observado um consumo residual de aproximadamente 5,3 mA mesmo com a saída de carga (*LOAD*) do controlador PWM desabilitada.

Embora esse comportamento indique que parte dos componentes eletrônicos permanece energizada, não foi possível identificar, nesta etapa do trabalho, qual dispositivo é o principal responsável por essa corrente. Dessa forma, recomenda-se que trabalhos futuros realizem a caracterização individual dos módulos eletrônicos da estação, permitindo identificar oportunidades adicionais de otimização do consumo energético.

4.3 Avaliação da metodologia de medição frente às recomendações da WMO

As recomendações estabelecidas pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) constituem a principal referência internacional para o projeto, instalação e operação de estações meteorológicas, buscando assegurar que os dados obtidos por diferentes sistemas apresentem elevada confiabilidade e comparabilidade ([WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2024](#)). Embora o presente trabalho tenha como objetivo principal o desenvolvimento de uma estação meteorológica automática de baixo consumo energético, a metodologia adotada foi concebida considerando, sempre que possível, as diretrizes apresentadas no *Guide to Instruments and Methods of Observation*. A seguir são discutidos os principais aspectos de conformidade e as limitações observadas durante a implementação.

Em relação às variáveis temperatura do ar e umidade relativa, o sensor BME280 foi instalado em abrigo metálico confeccionado especificamente para protegê-lo da incidência direta de radiação solar e da precipitação. Além disso, sua instalação foi realizada aproximadamente a 1,60 m do solo, atendendo ao intervalo recomendado pela WMO para esse tipo de medição (1,5 m a 2,0 m). Apesar disso, o abrigo empregado não possui sistema de ventilação aspirada, recurso utilizado em estações meteorológicas de referência para minimizar o aquecimento provocado pela radiação solar em condições de baixa velocidade do vento. Dessa forma, embora a solução adotada seja adequada para aplicações de monitoramento ambiental de baixo custo, admite-se que as medições possam apresentar desvios superiores aos observados em estações meteorológicas oficiais, principalmente durante períodos de elevada irradiância.

A medição da pressão atmosférica também é realizada pelo BME280, que incorpora um barômetro eletrônico com compensação térmica interna. Embora esse tipo de sensor apresente desempenho satisfatório para aplicações ambientais e de Internet das Coisas, sua exatidão é inferior àquela requerida para instrumentos utilizados em redes meteorológicas oficiais. Além disso, o sistema não realiza correções para redução da pressão ao nível médio do mar, uma vez que o objetivo deste trabalho concentrou-se na aquisição da pressão absoluta para fins de monitoramento local.

No caso da irradiância solar, foi empregado o piranômetro Apogee SP-110, instalado aproximadamente a 2 m do solo em posição nivelada e sem obstruções significativas ao horizonte, conforme recomendado pela WMO. Entretanto, o sensor utilizado pertence à categoria de piranômetros fotovoltaicos de silício, cuja resposta espectral difere daquela apresentada

pelos piranômetros de termopilha empregados em estações meteorológicas de referência. Essa característica pode introduzir pequenas diferenças de medição, principalmente em condições atmosféricas nas quais a composição espectral da radiação incidente sofre alterações significativas, como durante períodos de elevada nebulosidade.

A precipitação foi medida utilizando um pluviômetro de báscula instalado aproximadamente a 1,60 m do solo e devidamente nivelado. Embora essa configuração permita o monitoramento da chuva acumulada, sua resolução de 0,25 mm por pulso é inferior à resolução de 0,1 mm recomendada pela WMO para aplicações de maior precisão. Além disso, a instalação da estação em altura reduzida em relação ao entorno pode favorecer pequenas perdas aerodinâmicas associadas ao escoamento do vento sobre a boca coletora. Uma limitação adicional da metodologia está relacionada à estratégia de gerenciamento energético adotada pelo sistema. Durante o período em que o ESP8266 permanece em modo *Deep Sleep*, o microcontrolador interrompe completamente sua execução, impossibilitando a detecção dos pulsos provenientes do reed switch do pluviômetro.

Dessa forma, eventos de precipitação ocorridos durante o intervalo de repouso não são contabilizados, resultando em uma subestimação da lâmina de chuva acumulada. Essa limitação representa um compromisso inerente entre a maximização da autonomia energética e a continuidade das medições, sendo aceitável para os objetivos deste trabalho, cujo foco principal consiste na avaliação de uma arquitetura de estação meteorológica de baixo consumo energético. Trabalhos futuros poderão empregar circuitos dedicados para contagem de pulsos ou estratégias alternativas de baixo consumo que permitam o registro contínuo da precipitação sem comprometer significativamente a eficiência energética do sistema.

As medições de velocidade e direção do vento representam outro ponto divergente em relação às recomendações da WMO. O guia recomenda que esses sensores sejam instalados a aproximadamente 10 m acima do solo, em terreno aberto e suficientemente afastado de obstáculos capazes de modificar o escoamento do ar. Em razão das limitações estruturais do local de implantação e do caráter experimental da estação desenvolvida, tanto o anemômetro quanto o sensor de direção foram instalados a aproximadamente 2 m de altura. Essa configuração tende a subestimar a velocidade do vento em decorrência do atrito da camada limite atmosférica e da influência de obstáculos próximos, impossibilitando a comparação direta dos valores obtidos com aqueles registrados por estações meteorológicas oficiais.

Por outro lado, a estratégia de aquisição implementada no firmware encontra-se alinhada às recomendações da WMO para diversas variáveis meteorológicas. A utilização de subamostras periódicas, seguida do cálculo de médias de 2 minutos para as grandezas escalares, reduz a influência de flutuações instantâneas nas medições. Da mesma forma, a determinação da direção média do vento por meio da média vetorial evita inconsistências matemáticas associadas à transição entre 0° e 360° , enquanto o cálculo da rajada máxima em janelas de 3 s segue o procedimento recomendado internacionalmente para caracterização desse parâmetro.

De modo geral, observa-se que as principais limitações identificadas estão associadas às

características dos sensores empregados e às condições físicas de instalação, fatores inerentes ao desenvolvimento de uma estação meteorológica de baixo custo. Em contrapartida, as estratégias de aquisição, processamento e transmissão dos dados foram concebidas de forma a seguir, sempre que possível, as recomendações da Organização Meteorológica Mundial, conciliando qualidade das medições, simplicidade construtiva e baixo consumo energético. Assim, entende-se que a estação desenvolvida é adequada para aplicações de monitoramento ambiental, pesquisa e ensino, devendo, entretanto, ser consideradas suas limitações quando utilizada em comparações com redes meteorológicas oficiais ou em aplicações que demandem rastreabilidade metrológica de elevada precisão.

4.4 Interface de Monitoramento e Validação dos Dados

Com o objetivo de disponibilizar as informações coletadas pela estação meteorológica de forma acessível e intuitiva, foi desenvolvida uma interface web integrada ao banco de dados *Firebase*. A plataforma permite o acompanhamento remoto das variáveis meteorológicas em tempo real, bem como a consulta ao histórico das medições realizadas, constituindo a etapa final da arquitetura proposta neste trabalho. Dessa forma, além da aquisição e transmissão dos dados pelo nó sensor, o sistema desenvolvido oferece uma solução completa para armazenamento, visualização e interpretação das informações meteorológicas.

A tela principal da aplicação, apresentada na Figura 24, reúne os principais parâmetros monitorados pela estação, incluindo temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, precipitação acumulada, velocidade média do vento e velocidade de rajada. Também são exibidas informações auxiliares, como o estado de funcionamento da estação, a condição climática identificada a partir dos dados medidos e o tempo decorrido desde a última atualização, permitindo ao usuário verificar rapidamente a disponibilidade do sistema e o caráter recente das informações apresentadas.



Figura 24 – Tela principal da interface de monitoramento desenvolvida para a estação meteorológica.

Além da visualização das medições, a interface disponibiliza uma página destinada à apresentação da arquitetura de funcionamento da estação, ilustrada na Figura 25. Nessa tela é apresentado o fluxo completo percorrido pelos dados, desde a aquisição pelos sensores instalados no nó meteorológico, passando pelo processamento realizado pelo microcontrolador ESP8266, transmissão via tecnologia LoRa, recepção pelo gateway, armazenamento no Firebase e disponibilização ao usuário final por meio da interface web. Essa funcionalidade possui caráter educativo, permitindo aos usuários compreender de forma simplificada as diferentes etapas envolvidas no sistema desenvolvido.



Figura 25 – Tela ilustrando o fluxo de aquisição, transmissão e disponibilização dos dados meteorológicos.

Com o objetivo de tornar a plataforma mais interativa e ampliar seu potencial didático, foi desenvolvido um assistente virtual denominado *Meteorinho*, apresentado na Figura 26. O assistente foi integrado à aplicação web por meio da interface de programação de aplicações (API) de um modelo, permitindo a geração de respostas em linguagem natural a partir das perguntas formuladas pelos usuários.

O assistente é capaz de responder dúvidas relacionadas ao funcionamento da estação meteorológica, às variáveis monitoradas, aos sensores empregados, à tecnologia LoRa e a conceitos básicos de meteorologia. Dessa forma, além de disponibilizar os dados medidos, a plataforma também desempenha uma função educativa, permitindo que usuários sem conhecimentos técnicos compreendam o processo de aquisição das informações meteorológicas e a arquitetura desenvolvida neste trabalho.



Figura 26 – Assistente virtual desenvolvido para interação com os usuários da plataforma.

A interface também permite a consulta ao histórico das medições armazenadas no banco de dados, disponibilizando gráficos para diferentes períodos de observação, como a sessão atual, as últimas 24 horas e os últimos sete dias. A Figura 27 apresenta um exemplo da visualização gráfica disponibilizada pela aplicação para a variável temperatura do ar. Ferramentas semelhantes foram implementadas para todas as variáveis monitoradas pela estação, possibilitando o acompanhamento de tendências temporais e a análise do comportamento das condições meteorológicas ao longo do período de operação.



Figura 27 – Interface de visualização histórica das medições realizadas pela estação meteorológica.

A Figura 27 apresenta a evolução da temperatura do ar registrada pela estação meteorológica durante o período de monitoramento. Observa-se um comportamento cíclico diário, caracterizado pelo aumento gradual da temperatura ao longo da manhã, atingindo valores máximos durante o período da tarde e reduzindo-se novamente durante a noite e madrugada. Esse comportamento é compatível com o ciclo de aquecimento e resfriamento da superfície terrestre em função da incidência da radiação solar.

Durante o período analisado, a maior temperatura registrada foi de aproximadamente 30°C, observada na tarde do dia 23/07, enquanto a menor temperatura ocorreu na madrugada do dia 25/07, atingindo aproximadamente 10°C. A amplitude térmica observada evidencia condições típicas do inverno na região de Ouro Preto, caracterizadas por noites frias e aquecimento significativo durante o período diurno.

A Figura 28 apresenta a evolução da umidade relativa do ar durante o período de monitoramento.



Figura 28 – Interface de visualização histórica da umidade.

Observa-se uma relação inversa entre a umidade relativa e a temperatura do ar ao longo dos dias analisados. Durante o período noturno e nas primeiras horas da manhã foram registrados valores próximos da saturação, frequentemente superiores a 90%, enquanto durante o período da tarde ocorreram reduções expressivas, atingindo aproximadamente 30% no dia 23/07, coincidindo com a maior temperatura registrada na semana.

Esse comportamento está de acordo com o esperado para a umidade relativa, uma vez que o aumento da temperatura eleva a capacidade do ar de armazenar vapor d'água, reduzindo seu valor relativo quando o conteúdo absoluto de umidade permanece aproximadamente constante.

A Figura 29 apresenta os valores de pressão atmosférica registrados durante o período de monitoramento.



Figura 29 – Interface de visualização histórica da pressão atmosférica.

A pressão atmosférica permaneceu relativamente estável ao longo da semana, variando aproximadamente entre 881 hPa e 887 hPa. Essa faixa de valores é compatível com a altitude aproximada de 1.180 m do município de Ouro Preto, onde a pressão atmosférica naturalmente apresenta valores inferiores aos observados ao nível do mar.

Observa-se uma tendência de aumento da pressão entre os dias 23/07 e 24/07, seguida por pequenas oscilações nos dias subsequentes. Essas variações são compatíveis com alterações nas condições atmosféricas locais e demonstram que a estação foi capaz de detectar pequenas mudanças na pressão ambiente ao longo do período monitorado.

A Figura 30 apresenta a precipitação acumulada registrada durante o período analisado.



Figura 30 – Interface de visualização histórica das medições de chuva.

Durante o dia 24/07 ocorreu um evento de chuva observado no local de instalação da estação, o qual não foi registrado pelo sistema. Esse comportamento era esperado em função da estratégia de gerenciamento energético adotada neste trabalho. Durante os períodos de *Deep Sleep*, o microcontrolador permanece desligado e, conseqüentemente, não é capaz de contabilizar os pulsos provenientes do pluviômetro de báscula. Dessa forma, eventos de precipitação ocorridos durante o período de repouso deixam de ser registrados, caracterizando uma limitação da arquitetura desenvolvida.

Embora essa estratégia permita significativa redução do consumo energético, ela evidencia a necessidade de soluções futuras para aquisição contínua dos pulsos do pluviômetro.

A Figura 31 apresenta os valores de velocidade média e rajada do vento registrados durante o período de monitoramento.



Figura 31 – Interface de visualização histórica da velocidade média do vento.

O maior valor de velocidade média foi registrado no dia 25/07, atingindo aproximadamente 7,5 m/s. As rajadas apresentaram comportamento semelhante, destacando-se um pico de aproximadamente 20 m/s nesse mesmo dia. Os resultados demonstram que a estratégia de cálculo empregada foi capaz de distinguir adequadamente a velocidade média das rajadas, contudo, assim como o pluviômetro, a adoção de estratégias para uma captação mais fiel aos pulsos pode aprimorar esses resultados.

A Figura 32 apresenta os valores de irradiância solar registrados durante os sete dias de monitoramento.



Figura 32 – Interface de visualização histórica da pressão atmosférica.

Os resultados apresentam o comportamento esperado para a radiação solar global, com valores próximos de zero durante o período noturno e aumento progressivo ao longo da manhã até atingir os maiores valores próximos ao meio-dia solar.

Os maiores valores registrados aproximaram-se de $600 W/m^2$, observados principalmente nos dias 23/07, 24/07 e 26/07, indicando condições de céu predominantemente aberto. Em contrapartida, no dia 25/07 observa-se uma curva bastante irregular, caracterizada por sucessivas reduções e aumentos da irradiância ao longo do dia, comportamento típico da passagem intermitente de nuvens sobre o sensor.

De forma geral, os resultados apresentados demonstram que a estação meteorológica foi capaz de registrar adequadamente o comportamento das principais variáveis atmosféricas durante o período de monitoramento. As relações físicas esperadas entre temperatura, umidade, pressão, irradiância, precipitação e vento foram observadas nos dados coletados, indicando o correto funcionamento da arquitetura desenvolvida. As limitações identificadas, principalmente relacionadas ao monitoramento da precipitação durante os períodos de *Deep Sleep*, são discutidas na seção seguinte, onde a metodologia empregada é analisada à luz das recomendações da Organização Meteorológica Mundial.

5 Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de uma estação meteorológica automática de baixo consumo energético, concebida para aplicações de monitoramento ambiental remoto utilizando alimentação fotovoltaica. A arquitetura proposta integrou sensores meteorológicos, comunicação sem fio via tecnologia LoRa, armazenamento em nuvem por meio do Firebase e uma interface web para visualização e acompanhamento das variáveis monitoradas, resultando em uma solução capaz de realizar a aquisição, transmissão e disponibilização dos dados de forma contínua.

Os resultados experimentais demonstraram que a estratégia de gerenciamento energético adotada contribuiu significativamente para a redução do consumo médio da estação. A utilização do modo *Deep Sleep* permitiu reduzir a corrente média equivalente de 20,20 mA para 16,03 mA, correspondendo a uma redução de aproximadamente 24,4% em comparação a uma arquitetura operando continuamente em modo ativo. Como consequência, a autonomia teórica da bateria apresentou um incremento de aproximadamente 26,06%, passando de 11,55 para 14,56 dias de operação, considerando uma bateria VRLA-AGM de 7 Ah e uma profundidade máxima de descarga de 80%. Ressalta-se que essa estimativa desconsidera qualquer contribuição do sistema fotovoltaico, representando uma condição conservadora de operação. Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam a viabilidade da solução proposta para aplicações de monitoramento ambiental em locais remotos alimentados por energia solar.

Além da avaliação energética, verificou-se que a estação foi capaz de monitorar as principais variáveis meteorológicas de interesse, apresentando comportamento compatível com os fenômenos atmosféricos observados ao longo do período de aquisição dos dados. A interface desenvolvida possibilitou o acompanhamento remoto das medições em tempo real, bem como a consulta ao histórico das variáveis, agregando funcionalidades que ampliam o potencial de utilização da plataforma tanto para aplicações de monitoramento quanto para fins educacionais.

A comparação entre a metodologia adotada e as recomendações da Organização Meteorológica Mundial permitiu identificar que, embora diversas práticas empregadas estejam alinhadas às diretrizes internacionais, algumas limitações decorrem das escolhas realizadas visando baixo custo e eficiência energética. Destacam-se, principalmente, a altura reduzida de instalação dos sensores de vento e irradiância, a resolução do sensor de direção do vento e a impossibilidade de contabilizar continuamente os pulsos do pluviômetro durante os períodos de *Deep Sleep*. Ainda assim, tais limitações foram devidamente identificadas e discutidas, demonstrando a maturidade da solução proposta e estabelecendo oportunidades para sua evolução.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação da arquitetura utilizando sensores meteorológicos de maior precisão e desempenho metrológico, especialmente para medição de direção do vento, pressão atmosférica e irradiância solar. Também se sugere a instalação da

estação em uma torre com altura compatível com as recomendações da Organização Meteorológica Mundial, permitindo avaliar o impacto dessa alteração na qualidade das medições de vento e radiação solar.

Outra possibilidade consiste na investigação de estratégias alternativas de gerenciamento energético, incluindo diferentes modos de baixo consumo disponíveis para o microcontrolador, bem como a utilização de circuitos auxiliares dedicados à contagem contínua dos pulsos do pluviômetro durante o período de repouso. Adicionalmente, a redução da capacidade da bateria, aliada à otimização do consumo energético e ao melhor aproveitamento da geração fotovoltaica, pode contribuir para a diminuição do custo, do peso e das dimensões da estação sem comprometer sua autonomia operacional.

Por fim, recomenda-se a realização de campanhas experimentais de longa duração e estudos comparativos com estações meteorológicas de referência, permitindo avaliar quantitativamente a exatidão das medições realizadas e validar a arquitetura proposta em diferentes condições ambientais. A continuidade dessas investigações poderá contribuir para o desenvolvimento de estações meteorológicas automáticas de baixo custo, energeticamente eficientes e capazes de atender aplicações de monitoramento ambiental, pesquisa e ensino.

Referências

ADA, Lady; NEEDELL, Gerald; HERRADA, Eva; MONTOYA, Jose. *Adafruit BME280 Humidity + Barometric Pressure + Temperature Sensor Breakout*. 2025. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout>. Citado 2 vezes na página 25.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. *Diretrizes para Elaboração do Relatório de Instalação de Estações Hidrológicas*. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/monitoramento-hidrologico-do-setor-eletrico/resolucao-conjunta-ana-aneel-127-2022/DiretrizesparaElaboracaodoRelatoriodeInstalcaodeEstacoesHidrologicas.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31.

APOGEE INSTRUMENTS. *Pyranometer Models SP-110 and SP-230 Owner's Manual*. Logan, UT, 2025. Disponível em: <https://www.apogeeinstruments.com/content/SP-110-manual.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 32–34.

APOGEE INSTRUMENTS. *Silicon-cell Pyranometer Support*. 2026. Disponível em: <https://www.apogeeinstruments.com/silicon-cell-pyranometer-support/>. Citado 2 vezes na página 33.

APOGEE INSTRUMENTS. *SP-110-SS: Self-Powered Pyranometer*. 2026. Disponível em: <https://www.apogeeinstruments.com/sp-110-ss-self-powered-pyranometer/>. Citado 1 vez na página 32.

BASÍLIO, Ray da Silva. *Previsão de séries temporais de evapotranspiração de referência e desenvolvimento de estação meteorológica*. 2023. F. 123. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil. 123 f. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13, 38.

BOSCH SENSORTEC. *BME280 Data sheet: Combined humidity and pressure sensor*. Reutlingen, Alemanha, 2024. Disponível em: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 25–27.

BRAGA, Hugo José; RICCE, Wilian da Silva; PANDOLFO, Cristina; GARBOSSA, Luiz Hamilton Pospissil; MASSIGNAM, Angelo Mendes; BLAINSKI, Everton; VIEIRA, Hamilton Justino. A agrometeorologia catarinense: estações convencionais. *Documentos*, 2019. Disponível em: <https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/DOC/article/view/510>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 15.

BROWN, Jamie R. C.; WOODS, Ross; ROCHA, Humberto Ribeiro da; ROBERTI, Debora Regina; ROSOLEM, Rafael. Evaluation of high-resolution meteorological data products using flux tower observations across Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 30, n. 1, p. 141–162, 2026. DOI: [10.5194/hess-30-141-2026](https://doi.org/10.5194/hess-30-141-2026). Citado 2 vezes na página 11.

- CASTRO, Matheus Lima; VICHETE, William Dantas; LUSQUINO FILHO, Leopoldo. *METBRA25Y: Brazil Surface Meteorology Archive with Harmonized Variables and Quality Control*. 2026. DOI: [10.5281/zenodo.19964979](https://doi.org/10.5281/zenodo.19964979). Citado 1 vez na página 13.
- CHENGDU EBYTE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD. *E220-900T30D User Manual*. Versão 1.0, 2020. Disponível em: https://www.popolony2k.com.br/wp-content/uploads/2023/02/E220-900T22D_UserManual_EN_v1.0.pdf. Citado 1 vez na página 52.
- EASYTRONICS. *Conversor DC MP1584 Step Down Ajustável 3A*. Disponível em: <https://www.easytronics.com.br/mp1584-step-down-ajustavel-3a>. Citado 2 vezes nas páginas 37, 38.
- ENERGY SHOP. *Bateria Estacionária Moura VRLA 12MVA7 - 7Ah*. Disponível em: <https://www.energyshop.com.br/bateria-vrla/bateria-estacionaria-moura-vrla-12mva7-7ah>. Citado 4 vezes nas páginas 34, 35.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP8266EX Datasheet*. 2025. Version 7.1. Disponível em: https://documentation.espressif.com/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf. Citado 2 vezes nas páginas 24, 25.
- GOOGLE. *Firebase Realtime Database Documentation*. 2026. Disponível em: <https://firebase.google.com/docs/database>. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24.
- HART, Jane K.; MARTINEZ, Kirk. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? *Earth-Science Reviews*, v. 78, n. 3, p. 177–191, 2006. ISSN 0012-8252. DOI: [10.1016/j.earscirev.2006.05.001](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.05.001). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825206000511>. Citado 1 vez na página 13.
- HASIB, Abdul; AKIB, A. S. M. Ahsanul Sarkar. Cloud-Enabled IoT System for Real-Time Environmental Monitoring and Remote Device Control Using Firebase. *University of Frontier Technology*, 2026. DOI: [10.48550/arXiv.2601.17414](https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.17414). Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.17414>. Citado 1 vez na página 24.
- INMET. *Eventos extremos: chuvas intensas e calor marcam março de 2024*. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Abr. 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/eventos-extremos-chuvas-intensas-e-calor-marcam-mar%C3%A7o-de-2024>. Citado 1 vez na página 11.
- INMET. *Sobre meteorologia*. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia>. Citado 2 vezes na página 11.
- INMET. *Verão 2024-2025 foi o sexto mais quente no Brasil desde 1961*. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Mar. 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/ver%C3%A3o-2024-2025-foi-o-sexto-mais-quente-no-brasil-desde-1961>. Citado 1 vez na página 11.
- INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL - INCAPER. *Estações Meteorológicas*. INCAPER. Disponível em: <https://meteorologia.incaper.es.gov.br/estacoes-meteorologicas>. Citado 1 vez na página 15.

- IRAZABAL, Jean-Marc; BLOZIS, Steve. *AN10216-01: I2C Manual*. 2003. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN10216.pdf>. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22.
- K., Gavaskar; S., Arun; V., Anbumani; VELMURUGAN, Sathya Narayanan; M., Mathankumar. Low-power design and implementation of an enhanced I2C bus controller using open lane: from RTL to GDSII. *Scientific Reports*, 2026. DOI: [10.1038/s41598-026-53211-1](https://doi.org/10.1038/s41598-026-53211-1). Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-026-53211-1>. Citado 1 vez na página 23.
- KHALIFEH, Ala'; MAZUNGA, Felix; NECHIBVUTE, Action; NYAMBO, Benny Munyaradzi. Micro-controller Unit-Based Wireless Sensor Network Nodes: A Review. *Sensors*, v. 22, n. 22, p. 8937, 2022. DOI: [10.3390/s22228937](https://doi.org/10.3390/s22228937). Citado 1 vez na página 39.
- LACERDA SEGUNDO, Ramon Temporim; RIBEIRO, Ivandro da Silva. *Micro estação meteorológica aplicada com energia renovável e IOT*. 2019. (Programa de Iniciação Científica (PIC/UniCEUB)). DOI: [10.5102/pic.n0.2019.7442](https://doi.org/10.5102/pic.n0.2019.7442). Disponível em: <https://doi.org/10.5102/pic.n0.2019.7442>. Citado 2 vezes nas páginas 12, 13.
- LEITE JÚNIOR, Mirabor José; GEBLER, Luciano. Microestação meteorológica de baixo custo para monitoramento de variáveis microclimáticas na planta. *Jornal da Fruta*, 2022. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1146277/1/Gebler-RevdaFruta-2022a.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 13, 38.
- LORA ALLIANCE. *LoRaWAN L2 1.0.4 Specification*. 2020. Disponível em: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification>. Citado 2 vezes na página 21.
- LORA ALLIANCE. *LoRaWAN Regional Parameters RP002-1.0.5*. 2025. Disponível em: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-5-lorawan-regional-parameters>. Citado 1 vez na página 21.
- MARENGO, Jose A. Impactos sociais dos eventos climáticos extremos. *Ciência & Cultura*, v. 76, n. 4, 2024. DOI: [10.21800/2317-66602024000400008](https://doi.org/10.21800/2317-66602024000400008). Citado 1 vez na página 11.
- MASTERS, Gilbert M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. (IEEE Press), 2013. ISBN 978-1-118-14062-8. Citado 3 vezes na página 17.
- MCLAUGHLIN, Steve; GRANT, Peter M.; THOMPSON, John S.; HAAS, Harald; LAURENSEN, David I.; KHIRALLAH, Chadi; HOU, Ying; WANG, Rui. Techniques for improving cellular radio base station energy efficiency. *IEEE Wireless Communications*, v. 18, n. 5, p. 10–17, 2011. DOI: [10.1109/MWC.2011.6056687](https://doi.org/10.1109/MWC.2011.6056687). Citado 1 vez na página 18.
- MESSENGER, Roger A.; VENTRE, Jerry. *Photovoltaic Systems Engineering*. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 35.
- MONOLITHIC POWER SYSTEMS. *MP1584: 3A, 1.5MHz, 28V Step-Down Converter*. 2011. Rev. 1.0. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/551592/MPS/MP1584.html>. Citado 4 vezes nas páginas 37, 38.

- MONTAGNY, Sylvain. *LoRa, LoRaWAN and Internet of Things*. Université Savoie Mont Blanc, 2022. Disponível em: <https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Book-LoRa-LoRaWAN-and-Internet-of-Things.pdf>. Citado 2 vezes na página 21.
- MORNINGSTAR. *SunSaver*. Disponível em: <https://www.morningstarcorp.com/products/sunsaver/>. Citado 1 vez na página 35.
- MOURA. *Acumulador Elétrico Chumbo Ácido Estacionário VRLA-AGM*. 2020. Datasheet técnico. Disponível em: <https://5df841b7b6204c6b.cdn.gocache.net/marketing/asset/95/125407-01-3a97cadb.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 34, 35.
- NODA, Akihito; SHINODA, Hiroyuki. Inter-IC for Wearables (I2We): Power and Data Transfer over Double-sided Conductive Textile. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2018. DOI: 10.1109/TBCAS.2018.2881219. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8533373>. Citado 1 vez na página 23.
- NXP SEMICONDUCTORS. *UM10204: I2C-bus specification and user manual*. 2021. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>. Citado 6 vezes nas páginas 21–23.
- SALEHI, Shavbo; ESLAMNOUR, Behdis. Improving UAV base station energy efficiency for industrial IoT URLLC services by irregular repetition slotted-ALOHA. *Computer Networks*, v. 199, p. 108415, 2021. ISSN 1389-1286. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108415. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621003856>. Citado 1 vez na página 18.
- SALVADOR, Mozar de Araújo. *Danos sociais e econômicos decorrentes de desastres naturais em consequência de fenômenos meteorológicos no Brasil: 2010–2019*. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/publicacoesDigitais/impactos-clima-2010-20192.pdf>. Citado 1 vez na página 11.
- SANTOS, Leon Cardoso Marques dos. *Otimização do consumo energético em sistemas de monitoramento de colmeias utilizando etiquetas eletrônicas*. 2016. F. 70. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico Vale, Belém, Brasil. Citado 1 vez na página 38.
- SECRETARIA PARA APOIO À RECONSTRUÇÃO DO RIO GRANDE DO SUL. *Pesquisadores e gestores avaliam impactos sociais e econômicos da enchente de maio*. 2025. <https://www.gov.br/reconstrucaors/pt-br/acompanhe-a-reconstrucao/noticias/pesquisadores-e-gestores-avaliam-impactos-sociais-e-economicos-da-enchente-de-maio>. Acesso em: 02 ago. 2026. Citado 1 vez na página 11.
- SOFIANIDIS, Ioannis; KONSTANTAKOS, Vasileios; NIKOLAIDIS, Spyridon. Reducing Energy Consumption in Embedded Systems Applications. *Technologies*, v. 13, n. 2, p. 82, 2025. DOI: 10.3390/technologies13020082. Citado 1 vez na página 39.
- SOLAR Power Intelligent PV Controller: Instruction Book. Manual impresso que acompanha o controlador de carga PWM utilizado no projeto. Citado 1 vez nas páginas 35, 36.

STRAUB, Matheus Gebert. *Indicador de Direção do Vento com Arduino – Melhorando sua Estação Meteorológica*. 2019. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/blog/indicador-de-direcao-do-vento-com-arduino-melhorando-sua-estacao-meteorologica/>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30.

URRIZA, José M. et al. Economia de energia em dispositivos móveis. In: VI Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel. 2004. P. 48–56. Disponível em: http://www.ingelec.uns.edu.ar/rts/papers/Economia_de_Energia.pdf. Citado 2 vezes nas páginas 12, 19.

USINAINFO. *Anemômetro + Indicador de Direção do Vento para Estação Meteorológica - SVDV10*. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/estacao-meteorologica-arduino/anemometro-indicador-de-direcao-do-vento-para-estacao-meteorologica-svdv10-8353.html>. Citado 1 vez na página 29.

USINAINFO. *Anemômetro para Estação Meteorológica e Arduino - SV10*. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/estacao-meteorologica-arduino/anemometro-para-estacao-meteorologica-e-arduino-sv10-3686.html?srsltid=AfmB0oov4mseLtvrgYnw9arhzbPLp7xyaXNy36U0k6sgdYnSDQF5cErh>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28.

USINAINFO. *Pluviômetro de Báscula Digital para Estação Meteorológica - PB10*. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/estacao-meteorologica-arduino/pluviometro-de-bascula-digital-para-estacao-meteorologica-pb10-4637.html>. Citado 5 vezes nas páginas 30–32.

VAHID, Frank; GIVARGIS, Tony. *Embedded System Design: A Unified Hardware/Software Approach*. University of California, Riverside, 1999. Disponível em: <https://dsp-book.narod.ru/ESDUA.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23.

VALVANO, Jonathan W. *Embedded Systems: Real-Time Interfacing to ARM Cortex-M Microcontrollers*. 4th: Self-published, 2014. v. 2. ISBN 978-1463590154. Citado 1 vez na página 22.

VALVANO, Jonathan W. *Introduction to Embedded Systems: Interfacing to the Freescale 9S12*. 1. ed. Stamford: Cengage Learning, 2010. Disponível em: <https://www.cengage.com>. Citado 1 vez na página 12.

VEGA-GONZALEZ, I.; RAMÍREZ-BELTRÁN, J. Function-oriented energy model for low power sensor nodes analysis. *Journal of Applied Research and Technology*, v. 20, n. 2, p. 142–159, 2022. DOI: 10.1016/j.jart.2017.02.005. Citado 1 vez na página 38.

WEMOS. *LOLIN D1 mini*. 2024. Disponível em: https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini.html. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guide to Instruments and Methods of Observation*. 2024. ed. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2024. (WMO-No. 8). Volume I – Measurement of Meteorological Variables. Disponível em: <https://wmo.int/publication-series/guide-instruments-and-methods-of-observation-wmo-no-8>. Citado 14 vezes nas páginas 12, 19, 20, 27, 29, 45, 56.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. 8. ed. Geneva, Switzerland, 2018. P. 548. (WMO-No. 8). ISBN 978-92-63-10008-5. ISBN 978-92-63-10008-5. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10616. Citado 1 vez na página 15.

YICK, Jennifer; MUKHERJEE, Biswanath; GHOSAL, Dipak. Wireless Sensor Network Survey. *Computer Networks*, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008. DOI: [10.1016/j.comnet.2008.04.002](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128608001254>. Citado 1 vez na página 18.