DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE BAIXO CUSTO BASEADA EM ARDUINO PARA MONITORAMENTO CLIMÁTICO

Jalison Nascimento de Melo[1]; Rodrigo Mikosz Gonçalves[2]; Gilson Lima da Silva[3]; Lígia Albuquerque de Alcântara Ferreira[4]; Henry Diverth Montecino Castro[5]

RESUMO – O monitoramento de variáveis atmosféricas desempenha papel fundamental na análise climática, planejamento ambiental e gestão de riscos naturais. Entretanto, o elevado custo das estações meteorológicas automáticas comerciais limita sua difusão, especialmente em regiões em desenvolvimento e ambientes educacionais. Este estudo tem como objetivo desenvolver, implementar e validar uma estação meteorológica automática de baixo custo baseada na plataforma Arduino, integrando sensores acessíveis para monitoramento ambiental. O sistema incorpora sensores DHT11 para temperatura do ar e umidade relativa, sensor BMP280 para pressão atmosférica e sensor LM393 para detecção de chuva. A calibração dos sensores foi realizada por comparação direta com dados obtidos de estação meteorológica oficial operada pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Métricas estatísticas, incluindo Erro Absoluto Médio (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e indicadores de eficiência, foram aplicadas para avaliar a acurácia das medições. Os resultados demonstraram concordância satisfatória entre os sensores de baixo custo e a estação de referência, especialmente para temperatura (MAE = 0,62 °C; RMSE = 0,75 °C) e umidade relativa (MAE = 3,80%; RMSE = 4,32%). O sensor de chuva alcançou 82% de correspondência com os eventos de precipitação registrados. O custo total dos componentes eletrônicos da estação foi de aproximadamente R$ 200,00, valor consideravelmente inferior ao de estações comerciais equivalentes. Os resultados confirmam que sistemas meteorológicos de baixo custo, quando devidamente calibrados, podem fornecer dados ambientais confiáveis, representando alternativa viável para aplicações educacionais e monitoramento em regiões com infraestrutura limitada.

ABSTRACT – The monitoring of atmospheric variables plays a fundamental role in climate analysis, environmental planning, and natural hazard management. However, the high acquisition and maintenance cost of commercial automatic weather stations limits their widespread use, particularly in developing regions and educational environments. This study aims to develop, implement, and validate a low-cost automatic meteorological station based on the Arduino platform, integrating accessible sensors for environmental monitoring. The system incorporates a DHT11 sensor for air temperature and relative humidity, a BMP280 sensor for atmospheric pressure, and an LM393 sensor for rainfall detection. Sensor calibration was performed through direct comparison with data from an official meteorological station operated by the Pernambuco Agency for Water and Climate (APAC). Statistical performance metrics, including Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error

[1]Autor principal. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PPGCGTG), Departamento de Engenharia Cartográfica, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE, CEP 50670-901, Brasil. E-mail: jalison.melo@ufpe.br.
[2]Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Engenharia Cartográfica, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE, CEP 50670-901, Brasil. E-mail: rodrigo.mikosz@ufpe.br.
[3]Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Engenharia Cartográfica, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE, CEP 50670-901, Brasil. E-mail: gilson.lsilva@ufpe.br.
[4]Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Engenharia Cartográfica, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE, CEP 50670-901, Brasil. E-mail: ligia.alcantara@ufpe.br.
[5]Universidad de Concepción, Department of Cartography, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile. E-mail: henry.montecino@ufpe.br.

(RMSE), and efficiency indicators, were applied to assess measurement accuracy. The results demonstrated satisfactory agreement between the low-cost sensors and the reference station, particularly for temperature (MAE = 0.62 °C; RMSE = 0.75 °C) and relative humidity (MAE = 3.80%; RMSE = 4.32%). The rainfall sensor achieved 82% correspondence with recorded precipitation events. The total cost of the station's electronic components was approximately R$ 200.00, considerably lower than equivalent commercial stations. The findings confirm that low-cost meteorological systems, when properly calibrated, can provide reliable environmental data, representing a viable alternative for educational applications and environmental monitoring in regions with limited infrastructure.

Palavras-Chave – Estação meteorológica; Monitoramento ambiental; Dados climáticos.

1 - INTRODUÇÃO

O monitoramento de variáveis meteorológicas é fundamental para a compreensão da dinâmica climática, o planejamento ambiental e a gestão de recursos naturais. Informações sobre temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e precipitação são amplamente utilizadas em estudos climáticos, hidrológicos e agrícolas, além de subsidiar ações relacionadas à prevenção de desastres naturais (OLIVEIRA; MORAES; ROSA, 2014). Entretanto, o elevado custo de aquisição e manutenção das estações meteorológicas automáticas convencionais limita sua utilização, especialmente em regiões com infraestrutura reduzida e em instituições de ensino. Nesse contexto, o emprego de sensores de baixo custo associados a plataformas de microcontroladores representa uma alternativa viável para ampliar as redes de monitoramento ambiental (SILVA et al., 2024).

O avanço de tecnologias embarcadas, como Arduino e ESP32, possibilitou o desenvolvimento de sistemas acessíveis capazes de realizar aquisição, armazenamento e transmissão de dados em tempo real (MASSIMO; BANZI, 2020; KURNIAWAN, 2019). Apesar das vantagens econômicas, a utilização de sensores de baixo custo exige procedimentos de calibração para garantir a confiabilidade das medições, reduzindo erros sistemáticos e aproximando os resultados daqueles obtidos por estações meteorológicas de referência (KOJIMA; IAIONE; YOSHIMURA, 2019).

Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar uma estação meteorológica automática de baixo custo baseada na plataforma Arduino, integrando sensores para monitoramento de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e precipitação. O desempenho do sistema foi avaliado por meio da comparação com dados de uma estação oficial da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), visando verificar sua aplicabilidade em ações de monitoramento ambiental e recursos hídricos.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Áreas de Estudo

O estudo foi realizado em duas áreas localizadas no estado de Pernambuco, Brasil. A área A, situada no município de Olinda–PE, foi utilizada para a calibração dos sensores, enquanto a área B, localizada na Serra dos Cavalos, em Caruaru–PE, corresponde ao local de instalação e operação da estação meteorológica desenvolvida.

A área A está inserida na Região Metropolitana do Recife, apresentando características urbanas, altitude média de 16 m e clima tropical quente e úmido. A estação meteorológica de referência da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), utilizada na calibração dos sensores, encontra-se instalada no Espaço Ciência.

A área B corresponde ao Parque Natural Municipal Professor João Vasconcelos Sobrinho (Serra dos Cavalos), unidade de conservação localizada no Planalto da Borborema. A região caracteriza-se como brejo de altitude, com altitudes entre 750 e 950 m, apresentando temperaturas mais amenas e maior ocorrência de precipitação em relação às áreas semiáridas adjacentes.

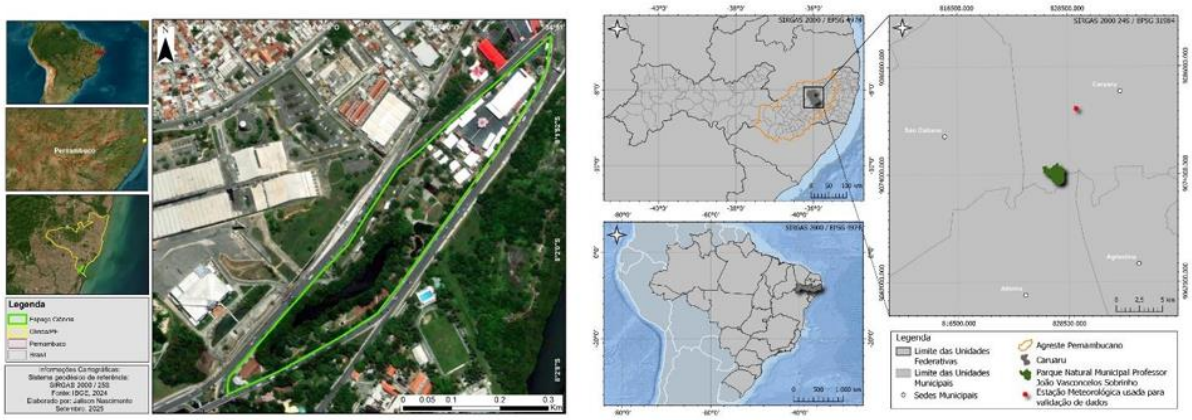


Figura 1 – Área de estudo: Espaço Ciência (Olinda, PE) / Serra dos Cavalos (Caruaru, PE).

2.2 Materiais

O sistema desenvolvido é baseado em plataforma de microcontrolador projetada para aquisição de dados ambientais em tempo real. A arquitetura consiste em sensores, unidade de processamento, sistema de alimentação e módulo de transmissão de dados. O microcontrolador utilizado neste estudo foi o ESP32, escolhido pelo baixo custo, conectividade Wi-Fi integrada e alto desempenho de processamento. O sistema de alimentação inclui bateria de lítio recarregável (3,7 V, tipo 18650) integrada a sistema de energia solar, composto por painéis fotovoltaicos e módulo controlador de carga, garantindo operação autônoma em ambientes remotos.

O sistema incorpora sensores de baixo custo para monitorar variáveis meteorológicas fundamentais: temperatura do ar e umidade relativa, medidas pelo sensor DHT11; pressão atmosférica, medida pelo sensor BMP280; e detecção de precipitação, realizada pelo módulo sensor de chuva LM393. Esses sensores foram selecionados com base no baixo custo, facilidade de integração e ampla utilização em projetos de sistemas embarcados.

Um dos critérios centrais de projeto foi o custo reduzido do sistema frente às estações meteorológicas automáticas comerciais. O levantamento de custos dos componentes eletrônicos utilizados na montagem da estação é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Custo dos componentes eletrônicos da estação meteorológica de baixo custo.

Componente	Função	Qtd.	Unit. (R$)	Subtotal (R$)
ESP32 (DevKit)	Microcontrolador Wi-Fi	1	40,00	40,00
DHT11	Temperatura/umidade	1	10,00	10,00

Componente	Função	Qtd.	Unit. (R$)	Subtotal (R$)
BMP280	Pressão atmosférica	1	18,00	18,00
LM393	Sensor de chuva	1	14,00	14,00
Bateria 18650 + painel solar	Alimentação	1	50,00	50,00
Protoboard/PCB	Montagem do circuito	1	32,00	32,00
Gabinete/abrigo	Proteção	1	40,00	40,00
			Custo total estimado	**R$ 204,00**

Fonte: Autores.

O valor obtido (≈ R$ 204,00) é significativamente inferior ao de estações comerciais equivalentes, que no mercado brasileiro variam entre R$ 2.000,00 e R$ 15.000,00. Essa diferença reforça a viabilidade econômica da solução proposta para aplicações educacionais e monitoramento ambiental em regiões com recursos financeiros limitados, ainda que o sistema não substitua estações certificadas para fins de rastreabilidade metrológica formal.

2.3 Métodos

O procedimento metodológico adotado para análise e calibração dos dados dos sensores de baixo custo baseia-se em abordagem estatística voltada a verificar diferenças entre os dados medidos e os obtidos de uma estação de referência. Define-se um tamanho mínimo de amostra $n \geq 30$ para garantir robustez estatística com base no Teorema Central do Limite. Subsequentemente, os dados são coletados dos sensores e da estação de referência, preferencialmente de forma simultânea, permitindo comparação por meio de observações pareadas.

A normalidade dos dados é avaliada por testes estatísticos como Shapiro-Wilk ou Kolmogorov-Smirnov. Caso os dados sigam distribuição normal, o teste t de Student é aplicado para comparar as médias amostrais; caso contrário, são empregados testes não paramétricos como Mann-Whitney ou Wilcoxon. Com base nos resultados, avalia-se a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os conjuntos de dados. Na ausência de diferenças significativas, a calibração não é necessária; caso contrário, realiza-se a calibração utilizando modelos matemáticos, como regressão linear ou ajustes baseados em fatores de escala e offset, a fim de minimizar os erros sistemáticos (VILELA; REZENDE, 2025).

A aquisição de dados foi realizada em intervalos de tempo regulares, com medições registradas e transmitidas via comunicação sem fio. O microcontrolador ESP32 processa as leituras dos sensores e envia os dados a uma plataforma externa para armazenamento e análise. O sistema foi configurado para garantir sincronização com a estação meteorológica de referência operada pela APAC, permitindo comparação direta entre conjuntos de dados sob condições ambientais similares (NAMETALA et al., 2021).

A calibração dos sensores foi realizada comparando as medições obtidas da estação de baixo custo com os dados da estação oficial da APAC, com alinhamento temporal para garantir consistência na comparação. Modelos de regressão linear foram aplicados para estabelecer relações entre valores medidos e de referência, possibilitando a correção das saídas dos sensores. Essa abordagem é comumente utilizada em procedimentos de calibração para reduzir o viés e melhorar a acurácia das medições (BARBOSA et al., 2012; DRACAL TECHNOLOGIES, 2023). Para avaliar o desempenho dos sensores, foram aplicadas métricas estatísticas amplamente utilizadas em análises de dados ambientais (MORIASI et al., 2007).

Tabela 2 – Métricas estatísticas utilizadas na validação dos dados.

Métrica	Sigla	Equação	Finalidade	Valor ideal
Erro Absoluto Médio	MAE	$MAE=(1/n)\Sigma\|xi-yi\|$	Magnitude média dos erros.	0 (quanto mais próximo de 0, melhor)
Raiz do Erro Quadrático Médio	RMSE	$RMSE=\sqrt{[(1/n)\Sigma(xi-yi)^2]}$	Penaliza erros maiores.	0 (quanto mais próximo de 0, melhor)
Coeficiente de Determinação	R^2	$R^2=1-[\Sigma(yi-xi)^2]/[\Sigma(yi-\bar{y})^2]$	Concordância entre observado e estimado.	1 (quanto mais próximo de 1, melhor)
Eficiência de Nash-Sutcliffe	NSE	$NSE=1-[\Sigma(yi-xi)^2]/[\Sigma(yi-\bar{y})^2]$	Capacidade preditiva do modelo.	1 (quanto mais próximo de 1, melhor)

Fonte: Autores.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme a seção 2.3, os sensores foram calibrados por regressão linear frente à estação da APAC antes da validação em campo. As análises das seções 3.1 a 3.3 referem-se aos dados já calibrados, coletados na área B (Serra dos Cavalos, Caruaru–PE); a comparação de desempenho antes/depois da calibração, obtida na área A (Olinda–PE), é apresentada na Tabela 2 (seção 3.4).

3.1 Análise de Temperatura

A Figura 2 apresenta comparação entre os valores de temperatura registrados pelo sensor DHT11, instalado na estação meteorológica de baixo custo, e os dados de referência fornecidos pela APAC ao longo do período analisado. Observa-se forte similaridade no comportamento das duas séries temporais, indicando que o sensor foi capaz de reproduzir adequadamente a dinâmica térmica ao longo do tempo. As variações diárias de temperatura, incluindo picos e quedas, são consistentemente acompanhadas pelo DHT11, demonstrando sua capacidade de capturar a variabilidade temporal.

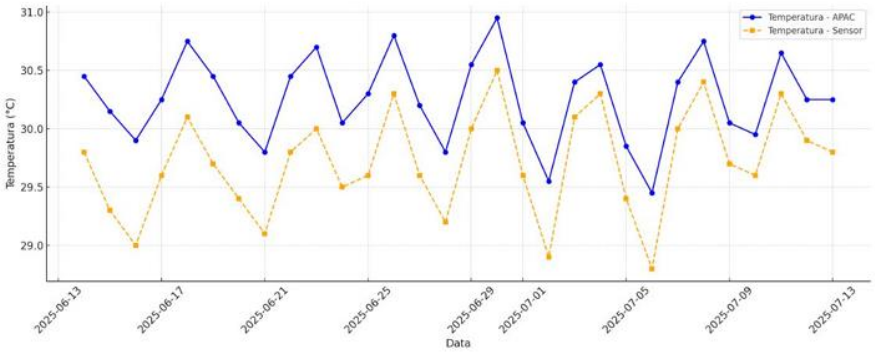


Figura 2 – Comparação entre a temperatura medida pelo sensor DHT11 (já calibrado) e os dados de referência da APAC. Fonte: Autores.

As pequenas diferenças visuais entre as curvas, perceptíveis em certos intervalos, refletem os erros estatísticos calculados após a calibração (MAE de 0,62 °C e RMSE de 0,75 °C). Essas discrepâncias residuais podem ser explicadas por fatores como resolução mais baixa do sensor, tempo de resposta mais lento e condições de exposição ambiental, como radiação solar direta e ventilação inadequada.

3.2 Análise de Umidade Relativa

A Figura 3 apresenta comparação entre os valores de umidade relativa registrados pelo sensor DHT11 e os dados de referência da APAC. Boa concordância pode ser observada entre as duas séries temporais, indicando que o sistema apresentou resultados consistentes na medição da umidade relativa. A análise estatística indicou MAE de 3,80% e RMSE de 4,32%, valores que demonstram concordância adequada entre os conjuntos de dados.

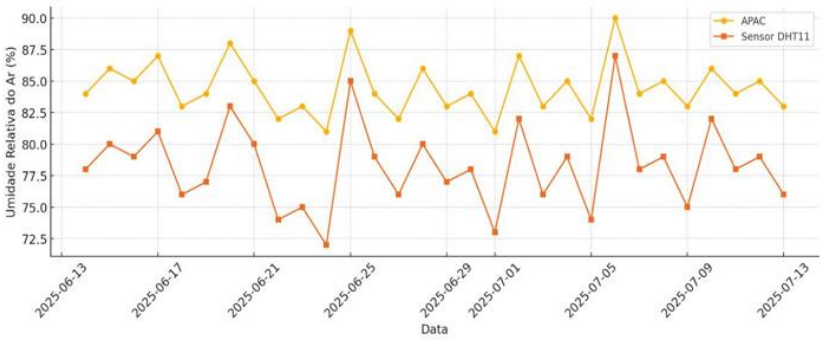


Figura 3 – Comparação entre a umidade relativa medida pelo sensor DHT11 (já calibrado) e os dados de referência da APAC. Fonte: Autores.

As maiores discrepâncias ocorreram durante períodos de rápidas variações atmosféricas, possivelmente devido ao menor tempo de resposta e à precisão limitada do sensor DHT11. Ainda assim, o sensor apresentou desempenho satisfatório para aplicações de baixo custo que não exigem elevada precisão instrumental.

3.3 Desempenho na Detecção de Precipitação

O sensor de chuva LM393 apresentou desempenho qualitativo satisfatório, com aproximadamente 82% de concordância na detecção de eventos de precipitação quando comparado aos registros da APAC. Embora o sensor não forneça medições quantitativas de precipitação, sua capacidade de detectar a ocorrência de chuva o torna útil para aplicações onde informações binárias (chuva/sem chuva) são suficientes. Algumas discrepâncias foram observadas, especialmente durante períodos de precipitação leve, quando o sensor pode não atingir o limiar de detecção configurado.

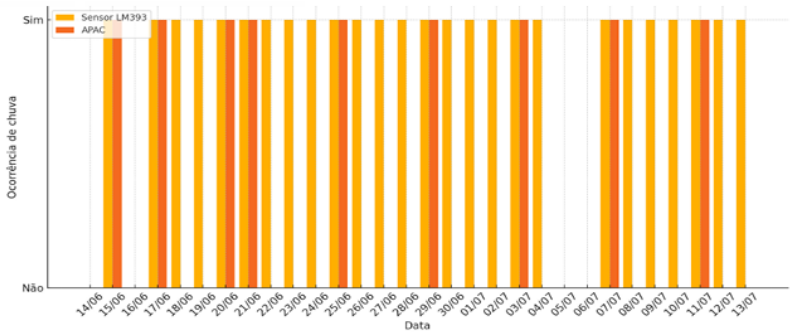


Figura 4 – Comparação entre a detecção de eventos de chuva pelo sensor LM393 e os dados de referência da APAC. Fonte: Autores.

3.4 Desempenho Geral do Sistema

A análise integrada de todas as variáveis indica que o sistema desenvolvido é capaz de fornecer dados meteorológicos confiáveis quando devidamente calibrado. A Tabela 2 demonstra que a calibração, realizada na área A por comparação direta com a estação de referência da APAC, promoveu melhorias significativas no desempenho dos sensores, reduzindo substancialmente os erros de medição. Para temperatura, observa-se notável diminuição nos valores de MAE e RMSE, indicando maior concordância entre os dados medidos e de referência. Similarmente, a umidade relativa apresentou redução acentuada dos erros após a calibração.

Tabela 3 – Métricas de desempenho antes e após a calibração dos sensores.

Variável	Métrica	Antes da calibração	Depois da calibração
Temperatura	MAE	2,18 °C	0,34 °C
Temperatura	RMSE	2,60 °C	0,40 °C
Temperatura	Willmott d	0,156	0,059
Temperatura	NSE	-0,42	—
Umidade	MAE	19,62 %	0,96 %
Umidade	RMSE	20,25 %	1,17 %
Umidade	Willmott d	0,085	0,305
Umidade	NSE	-1,15	—

Fonte: Autores.

A calibração reduziu significativamente tanto o erro médio quanto a raiz do erro quadrático médio para ambas as variáveis, com o MAE diminuindo de 2,18 °C para 0,34 °C para temperatura, e de 19,62% para menos de 1% para umidade relativa. Os resultados confirmam que estações meteorológicas de baixo custo podem ser alternativa viável para monitoramento ambiental, especialmente em regiões com acesso limitado a infraestrutura convencional.

3.5 Discussão em Relação à Literatura

Os resultados obtidos foram consistentes com estudos que empregaram plataformas Arduino e ESP32 associadas a sensores de baixo custo para monitoramento ambiental (TORRES et al., 2015; NAMETALA et al., 2021; AVELINO MAZUREK et al., 2024). Para temperatura, os valores de erro obtidos (MAE = 0,62 °C; RMSE = 0,75 °C) são semelhantes aos reportados por Nametala et al. (2021) e Baratto et al. (2020), confirmando a adequação do sensor DHT11 após calibração. Para umidade relativa, os resultados também se mantiveram dentro da faixa observada na literatura. Na detecção de precipitação, o sensor LM393 apresentou 82% de concordância com os dados da APAC, desempenho superior ao relatado por Melo et al. (2020). De modo geral, os resultados reforçam que sistemas meteorológicos de baixo custo, quando devidamente calibrados, podem fornecer dados confiáveis para aplicações de monitoramento ambiental.

4 - CONCLUSÕES

Este estudo apresentou o desenvolvimento, calibração e validação de uma estação meteorológica automática de baixo custo baseada em microcontrolador ESP32 e sensores ambientais acessíveis. Os resultados demonstraram que, após a aplicação de procedimentos de calibração estatística, o sistema foi capaz de produzir medições confiáveis de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica quando comparado a dados de uma estação meteorológica oficial.

O desempenho do sensor DHT11 foi considerado satisfatório para monitoramento de temperatura e umidade, apesar de suas limitações conhecidas em precisão e tempo de resposta. O sensor BMP280 demonstrou alta confiabilidade para medições de pressão atmosférica, reforçando sua adequabilidade para sistemas de monitoramento ambiental de baixo custo. O sensor LM393, embora limitado à detecção qualitativa, mostrou-se eficaz na identificação de eventos de precipitação.

Os indicadores estatísticos obtidos, incluindo MAE e RMSE, confirmaram que os desvios entre o sistema de baixo custo e a estação de referência permaneceram dentro de limites aceitáveis para aplicações práticas. Com custo total de aproximadamente R$ 204,00, o sistema proposto representa alternativa viável e acessível para aquisição de dados meteorológicos, particularmente em regiões com infraestrutura e recursos financeiros limitados. Trabalhos futuros podem incluir a integração de

sensores de maior precisão, a implementação de modelos avançados de calibração e a expansão do sistema para transmissão de dados em tempo real utilizando plataformas IoT.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) pelo fornecimento de dados meteorológicos, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (UFPE) e ao projeto de práticas de recuperação do Bioma Caatinga e seus Brejos de Altitude pelo apoio a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). Dados meteorológicos oficiais. Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/. Acesso em: 3 jun. 2025.

AVELINO MAZUREK, Leandro et al. Desenvolvimento e validação de estação meteorológica alternativa integrada a aplicações Web e Android. Nativa, v. 12, n. 4, 2024.

BARBOSA, A. S. et al. Uma Plataforma de Hardware e Software para Medição de Temperatura Utilizando Diferentes Tecnologias de Sensores. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS), 2012.

BARATTO, Jakeline; GALVANI, Emerson; WOLLMANN, Cássio Arthur. Calibração e desempenho do abrigo meteorológico de baixo custo em condições de campo. Revista Brasileira de Climatologia, v. 26, 2020.

DA SILVA, Albert Einstein Lima; DE SOUSA, Rita de Cassia Pompeu. Desenvolvimento de uma estação meteorológica em software e hardware aberto. Journal of Media Critiques, v. 10, n. 26, p. e64-e64, 2024.

DRACAL TECHNOLOGIES. 3-point user calibration mechanism. Disponível em: http://www.dracal.com/en/dracal_calibration_documentation/. Acesso em: 8 jun. 2025.

KOJIMA, E. H.; IAIONE, F.; YOSHIMURA, V. L. Sistema para automação da calibração de sensores de temperatura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA), 2019.

KURNIAWAN, Agus. Internet of Things Projects with ESP32. Packt Publishing Ltd, 2019.

LU, Guang-qiu et al. Design of factory environmental monitoring system based on Internet of Things. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIG DATA ANALYTICS FOR CYBER-PHYSICAL-SYSTEMS, 2019, Singapore. Proceedings. Singapore: Springer, 2019.

MASSIMO, B.; BANZI, D. Arduino: a quick-start guide. 3. ed. O'Reilly Media, 2020.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NAMETALA, Matheus et al. Estação meteorológica de baixo custo para cálculo, armazenamento e exibição da evapotranspiração de referência. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, v. 6, n. 2, 2021.

OLIVEIRA, R. R.; MORAES, J. C. F.; ROSA, A. P. ArdWeather: uma estação meteorológica baseada no Arduino e em web services RESTful. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, 14., 2014, Buenos Aires. Anais. Buenos Aires: COPEC, 2014. p. 1-5.

SILVA, Alisson Gabriel Lucas da. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de variáveis pluviométricas utilizando o microcontrolador ESP32. 2024.

TORRES, João Delfino et al. Aquisição de dados meteorológicos através da plataforma Arduino: construção de baixo custo e análise de dados. Scientia Plena, v. 11, n. 2, 2015.

VILELA, Flávio Fraga; REZENDE, Isadora Bernardo. Apresentação de framework para calibração de sensores de temperatura. Brazilian Journal of Production Engineering, v. 11, n. 2, p. 147, 2025.