



## Desenvolvimento e implementação de uma estação meteorológica automática embarcada baseada em tecnologia IoT

João Luiz Pontes de ARAÚJO <sup>1,2</sup>, Caio Castro RODRIGUES <sup>3</sup>, Otavio Andre CHASE <sup>1</sup>,  
Katiane Pereira da SILVA <sup>\*1</sup>, Hildo Giuseppe Garcia Caldas NUNES <sup>1</sup>,  
Antonio Thiago Madeira BEIRÃO <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil.

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Tecnológico Vale, Belém, PA, Brasil.

\*E-mail: [katiane.silva@ufra.edu.br](mailto:katiane.silva@ufra.edu.br)

Submetido em 11/12/2023; Aceito em 14/02/2024; Publicado em: 26/02/2024.

**RESUMO:** Este artigo descreve o desenvolvimento e implementação de uma estação meteorológica automática embarcada baseada no microcontrolador ESP8266 NodeMCU V3 e na plataforma IoT ThingSpeak, em Belém - PA. Foram coletados dados de temperatura e umidade, velocidade do vento e precipitação usando os sensores AM2301, SEN017 e PB10, respectivamente, durante o período de 13/05/2022-14/05/2022, realizando leituras horárias conforme a estação de referência do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) local, armazenando e visualizando os dados por meio da plataforma ThingSpeak. Para comparar os dados da estação desenvolvida com a estação de referência, foram aplicados métodos estatísticos como Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), Coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $E_f$ ), Índice de Concordância de Willmott ( $d$ ), e indicadores de erro Erro Médio Absoluto (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Percentual Médio de Erro (PBias). Os resultados mostraram que os índices foram predominantemente classificados como 'Muito Bom' e 'Bom' para as variáveis de temperatura e umidade, com valores de  $R^2$  de 0,95 e 0,89, respectivamente. No entanto, a variável de velocidade do vento apresentou um valor baixo de  $R^2$  (0,03). As variáveis observadas, incluindo precipitação, mostraram comportamentos compatíveis com a área de estudo. Devido à distância geográfica das estações e a distribuição das variáveis, não é possível inferir a acurácia real dos sensores utilizados. No entanto, a análise realizada demonstrou a funcionalidade da estação, sugerindo para trabalhos futuros a validação da estação desenvolvida por meio da ampliação do período de observação e instalação próxima de uma estação meteorológica automática com erro instrumental conhecido, utilizando os dados desta como referência.

**Palavras-chave:** monitoramento meteorológico; microcontroladores; ThingSpeak.

### Development and implementation of an embedded automatic weather station based on IoT technology

**ABSTRACT:** This article describes developing and implementing an embedded automatic weather station based on the ESP8266 NodeMCU V3 microcontroller and the ThingSpeak IoT platform in Belém, PA. Temperature and humidity, wind speed and precipitation data were collected using the AM2301, SEN017 and PB10 sensors, respectively, during the period 13/05/2022-14/05/2022, taking hourly readings according to the reference station of the local National Institute of Meteorology (INMET), storing and visualizing the data using the ThingSpeak platform. To compare the data from the developed station with the reference station, statistical methods such as the Coefficient of Determination ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffe Coefficient ( $E_f$ ), Willmott Concordance Index ( $d$ ), and error indicators Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Percentage Error (PBias) were applied. The results showed that the indices were predominantly classified as 'Very Good' and 'Good' for the temperature and humidity variables, with  $R^2$  values of 0.95 and 0.89, respectively. However, the wind speed variable had a low  $R^2$  value (0.03). Due to the geographical distance of the stations and the distribution of the variables, it is impossible to infer the real accuracy of the sensors used. However, the analysis demonstrated the station's functionality, suggesting that future work should validate the station developed by extending the observation period and installing it near an automatic weather station with known instrumental error, using its data as a reference.

**Keywords:** weather monitoring; microcontrollers; ThingSpeak.

### 1. INTRODUÇÃO

O município de Belém é a capital do estado do Pará, localizado na região Norte do Brasil e situado no bioma

Amazônico (IBGE, 2021). Devido sua localização geográfica na região Amazônica (Zona Equatorial), possui uma maior homogeneidade espacial e temporal de precipitação,

apresentando dois tipos de variações climáticas apresentadas durante o ano, que são denominadas como superúmido e subúmido, caracterizados pelas médias de temperatura de 25,9°C, umidade relativa média de 84% e precipitação anual acima de 2500 mm (ALVARES et al., 2013a; PONTES et al., 2017; SOARES; CARVALHO, 2018).

Associando a caracterização climática aos problemas socioambientais enfrentados pelo município, os quais são provenientes de vários processos naturais e antrópicos, acrescidas das características físicas e geográficas da região, como a topografia e o relevo, eventos climáticos extremos como alagamentos, inundações e enchentes são agravados no período de inverno, sendo estes causados por chuvas intensas e contínuas (GUIMARÃES et al., 2017; FONSECA et al., 2018).

Logo, o monitoramento e o estudo das variáveis meteorológicas são providenciais na gestão e planejamento, tomada de decisões e estudos de curto e longo prazo, abrangendo diversos setores como a agricultura, construção civil, setor energético e turismo (TATOVIC et al., 2016). No Brasil, esse monitoramento é realizado, principalmente, através das estações meteorológicas automáticas e convencionais sobre gerência do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Devido aos aspectos intrínsecos aos métodos utilizados nesse monitoramento e, majoritariamente, à tecnologia empregada, surgem limitações que impedem o desenvolvimento de estudos e empreendimentos que utilizem a coleta de dados meteorológicos como subsídio. Entre tais limitações, temos o alto custo financeiro para a implementação da tecnologia e de sensores classicamente utilizados, complexidade de operação, transmissão/compartilhamento de dados limitados e um cenário nacional de escassez de produção tecnológica (ELIAS et al., 2014; MORÓN et al., 2018; NIŽETIĆ et al., 2020).

Para contornar essas limitações advindas do método e da tecnologia, sistemas embarcados com microcontroladores de baixo custo, baixo consumo energético e fácil manutenção se tornam alternativas bastante difundidas atualmente, recebendo as mais diversas e variadas aplicações (KONDAVEETI et al., 2017).

Destaca-se, então, nesse panorama, o emprego do conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*), que consiste na conexão de inúmeros dispositivos capazes de coletar, enviar e receber dados pela internet, criando um ambiente inteligente mantido através de microcontroladores, sensores e atuadores com recursos inteligentes, sem que haja a intervenção humana no processo (KASHYAP et al., 2018; ZHAO; YI, 2022).

Concatenando a conceituação realizada, a literatura apresenta um vasto acervo de estudos e pesquisas para embasar a ideia desenvolvida neste trabalho. Fica claro a versatilidade de aplicações as quais os conceitos e tecnologias podem assumir e ocupar através da produção científica, onde se ressaltam as utilidades e retornos em vários setores como o da agricultura (ABBASSI; BENLAHMER, 2021), meteorologia (STRIGARO et al., 2019), gestão ambiental (YE et al., 2021), energia (KHATUA et al., 2019), entre outros.

Neste contexto, diversas plataformas e periféricos se sobressaem, como a plataforma de IoT ThingSpeak e a placa de prototipagem ESP8266 NodeMCU V3, além dos sensores

utilizados por Coulby et al. (2021) no desenvolvimento de um sistema de monitoramento ambiental multimodal. Em consonância, Medeiros & Girão (2020) apresentam uma plataforma de monitoramento baseada em IoT, fundada na emergência de sensores de baixo custo, enquanto Kondaveeti et al. (2017) apresentaram uma valorosa revisão de prototipação envolvendo um ou mais dos elementos citados nos trabalhos anteriores.

Em suas pesquisas, de forma mais pontual e específica, Bajrami; Murturi (2018), Mota et al. (2018), Silva Filho et al. (2019) e Santos; Ferreira (2020) desenvolvem propostas análogas ao escopo do presente trabalho com a utilização de componentes iguais ou semelhantes, dentre os quais se destacam o microcontrolador ESP8266 NodeMCU V3 e os sensores DHT11 e DHT22, similares ao sensor AM2301, além da alimentação de seus sistemas através das baterias de Li-íon recarregáveis através de placas fotovoltaicas. Em relação à proposta metodológica definida para a obtenção de resultados, os trabalhos de Mota et al. (2018) e Silva Filho et al. (2019) apresentam um ou mais métodos de análise estatística e indicadores de erros aos quais são comumente utilizados para a comparação entre séries de dados meteorológicos.

Baseado na problemática desenvolvida, esta pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento e implementação de uma estação meteorológica automática embarcada, baseada na plataforma NodeMCU, abrangendo o conceito de Internet das Coisas, com o objetivo de oferecer um produto capaz medir, adquirir, armazenar e monitorar dados das variáveis de Temperatura do Ar, Umidade Relativa do Ar, Velocidade do Vento e Precipitação. Assim, por conseguinte, oferecer uma alternativa de fácil acesso às informações meteorológicas através da plataforma IoT ThingSpeak, de aplicação versátil e variada, acessível, de baixo custo, baixo consumo energético e fácil manutenção.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O município de Belém (01°28'S, 48°29'W) é a capital do Estado do Pará, possuindo 1.059,446 Km<sup>2</sup> de extensão, sendo classificado como Metrópole (1C) e estabelecido na mesorregião Metropolitana de Belém, pertencendo ao Sistema Costeiro-Marinheiro e situado no bioma Amazônia, de tipo climático predominantemente do grupo tropical, dos tipos equatorial (Af) e de monção (Am), segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013b; IBGE, 2021).

O município possui oficialmente 8 distritos administrativos: Distrito Administrativo de Mosqueiro (DAMOS), Distrito Administrativo de Outeiro (DAOUT), Distrito Administrativo de Icoaraci (DAICO), Distrito Administrativo do Bengui (DABEN), Distrito Administrativo do Entroncamento (DAENT), Distrito Administrativo da Sacramenta (DASAC), Distrito Administrativo de Belém (DABEL) e Distrito Administrativo do Guamá (DAGUA). Os distritos administrativos de Mosqueiro, Outeiro e Icoaraci foram excluídos da área de estudo devido à distância dos pontos de coleta e estações convencionais e automáticas localizadas no município. Dentro da área delimitada são encontradas 2 estações convencionais, 1 estação automática e 8 pluviômetros automáticos, de acordo com o INMET.

O ponto de coleta das informações meteorológicas se localiza junto às instalações do Grupo de Pesquisa Interação

Solo-Planta-Atmosfera (ISPAAm) e do Laboratório de Agrometeorologia, na Universidade Federal Rural da Amazônia (Ufra) (1°27'S, 48°26'W), caracterizado pela baixa densidade de construções e vegetação preservada nos arredores e altitude aproximada de 14m.

A estação automática de referência é de propriedade do INMET, localizada a aproximadamente 5,2 Km (1°24'S, 48°26'W), a uma altitude de 21,17m e tem sua situação assinalada como operante, em uma área com maior densidade de construções, sem muita vegetação ao redor e maior impermeabilização do solo, fazendo com que estes fatores pesem nas análises comparativas juntamente ao erro instrumental e das distribuições espaciais e temporais das variáveis observadas na (Figura 1). A partir dessa estação foram obtidos dados das variáveis temperatura, umidade, velocidade do vento e precipitação.

Ressalta-se, todavia, que a ênfase nas características de cada ponto de coleta sublinham os efeitos do uso e ocupação do solo e da distribuição espacial e temporal sobre as variáveis analisadas, fazendo com que os dados obtidos pela estação desenvolvida e os dados da estação automática de referência do INMET sejam representativos de suas respectivas localizações devido a significativa distância geográfica entre ambas.

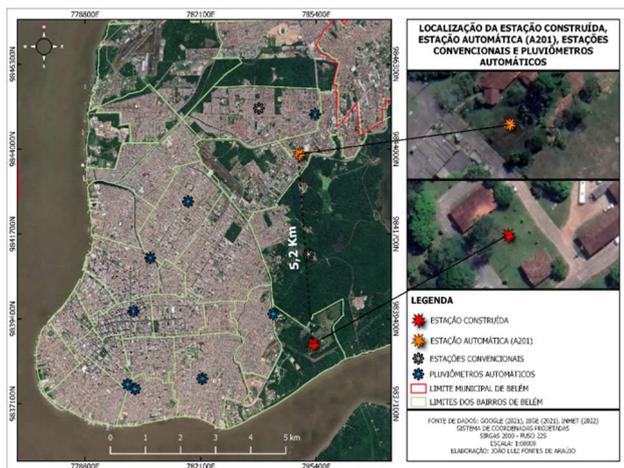


Figura 1. Mapa de localização dos pontos de coleta, estações convencionais, estações automáticas e pluviômetros automáticos dentro da área de estudo.

Figure 1. Location map of collection points, conventional stations, automatic stations, and automatic rain gauges within the study area.

## 2.2. Caracterização do sistema embarcado

A estação construída tem como principal componente a placa de prototipagem ESP8266 NodeMCU V3, a qual tem conectada a si o anemômetro SEN0170, para medições de velocidade do vento, com resolução de 0,1m/s e acurácia de  $\pm 3\%$ , o Pluviômetro de Bâscula PB10 (indicado no diagrama eletrônico pelo *reed switch* interno), para medições de precipitação, com acurácia de  $\pm 4\%$  (até 30 mm/h),  $\pm 5\%$  (até 50mm/h),  $\pm 7\%$  (até 90 mm/h), e o sensor de temperatura e umidade AM2301, para medições de temperatura do ar e umidade relativa do ar, com acurácia  $\pm 0,3$  para temperatura e de  $\pm 3\%$  e para a umidade. Para o que o usuário fosse capaz de realizar leituras das variáveis *in loco* foi utilizado um *display* LCD I2C.

O sistema de potência e alimentação da estação conta com um módulo controlador de carga TP4056, um regulador de tensão ajustável DC-DC *Step Up* XL6009, uma fonte DC

de 12V, para alimentação exclusiva do anemômetro, uma bateria de lítio recarregável de 4,2V/9,8Ah e uma placa fotovoltaica de 3Wp, que serve para recarga da bateria/banco de baterias, os quais podem servir tanto para o funcionamento autônomo do sistema ou em situações de emergência, para casos de falta de energia da rede concessionária, uma vez que o sistema é alimentado diretamente pela entrada micro USB através de uma fonte DC de 5V.

Todos estes componentes foram afixados à uma placa de fenolite cobreada perfurada ou receberam bornes de parafuso para ligar seus terminais de sinal e alimentação. As conexões na placa foram feitas através de trilhas de solda de estanho, a fim de diminuir o risco de mal contato advindo do uso integral de cabos, embora que cabos *jumper* também foram utilizados, mas igualmente soldados à placa (Figura 2).

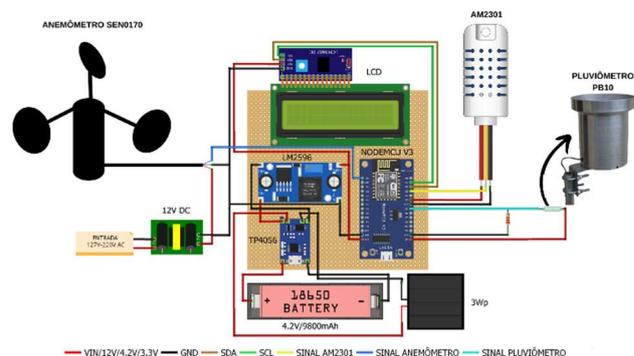


Figura 2. Componentes do sistema da estação e estrutura de conexões entre placa microcontroladora, sensores e sistema de potência.

Figure 2. Station system components and connection structure between microcontroller board, sensors, and power system.

Descrevendo a estrutura de conexões, temos que o sensor AM2301 e o pluviômetro são ligados nas portas GPIO0 e GPIO14, as quais recebem sinais digitais, enquanto o anemômetro é ligado na porta ADC0, que recebe sinais analógicos. O display LCD possui o módulo LCM1602, que permite conectar *displays* de matrizes 8x2, 16x2, 20x4 a qualquer microcontrolador através do barramento I2C, reduzindo consideravelmente o número de portas a serem utilizadas, ocupando somente as portas GPIO5 e GPIO4.

O sistema de potência e alimentação tem sua fase neutra conectada à porta GND, enquanto a saída de tensão regulada pelo XL6009 recebida do módulo TP4056 é conectada à porta VIN, que mantém a tensão de referência nesta porta e distribui através do regulador interno AMS1117 para as portas 3,3V. Este sistema é alimentado pelo banco de baterias que podem ser carregadas diretamente através da entrada micro USB do TP4056 ou por uma placa fotovoltaica embarcada. Ademais, apenas o anemômetro possui uma fonte DC exclusiva de 12V, que é conectada diretamente a uma entrada 127-220V AC, compartilhando a fase neutra com o restante do sistema embarcado.

Toda a estrutura de componentes eletrônicos, sensores e sistema de potência foi acondicionada em uma caixa plástica de grau de proteção IP65 (totalmente protegida contra a poeira e contra jatos d'água), enquanto o cabeamento foi encaminhado através de dutos corrugados PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e isolados com fita autofusão, a fim de reduzir danos causados por infiltração de água e umidade. Por fim, os componentes foram fixados em um

trípé com mastro articulado, de altura regulada a 1,5m do solo. A Figura 3 ilustra a estação desenvolvida e em estado de operação no ponto de coleta.



Figura 3. Estação desenvolvida em modo operante no ponto de coleta.

Figure 3. Station developed in operational mode at the collection point.

### 2.3. Implementação do algoritmo de funcionamento da estação

Para realizar a aquisição e coleta de dados, foi desenvolvido e carregado para a placa microcontroladora um algoritmo através do *software* Arduino IDE 1.8.19, o qual interpreta a lógica de funcionamento de cada componente embarcado no sistema através da linguagem de programação C++. A aquisição e processamento dos dados pela placa microcontroladora é feita a partir da conversão de uma grandeza elétrica, proveniente dos pulsos emitidos pelo pluviômetro e anemômetro, respectivamente, para uma grandeza compatível com a variável observada através da interpretação lógica dos sinais recebidos, enquanto os valores de temperatura e umidade são interpretados a partir da resistividade do sensor AM2301.

O fluxo lógico construído através do algoritmo implementando segue da seguinte forma: são declaradas as bibliotecas <ESP8266WiFi.h>, responsável pela comunicação *WiFi* do microcontrolador com a rede designada pelo usuário e conexão com a plataforma ThingSpeak, <Wire.h>, responsável pela comunicação I2C do controlador integrado ao LCD, <LiquidCrystal\_I2C.h>, que permite o controle do *display* LCD I2C, e <DHT.h>, biblioteca desenvolvida para a série de sensores de temperatura e umidade DHT, na qual está incluso o sensor AM2301. Logo em seguida são assinalados os pinos onde são conectados os sensores e módulos, declaradas as variáveis e constantes utilizadas nos cálculos de tradução dos pulsos emitidos pelo anemômetro e pluviômetro, além das informações da rede a ser utilizada. O setup do programa inicia o *display* LCD e AM2301, definindo o pino de conexão do pluviômetro para o modo *INPUT*, realizando logo em seguida a conexão com a rede *WiFi* e finalizando as condições iniciais. O loop se inicia e lê os sinais emitidos pelo

pluviômetro, anemômetro e AM2301, transmitindo para o LCD de 2 em 2s e podendo transmitir para o canal na plataforma ThingSpeak a cada 15s, tempo mínimo de atualização da plataforma, retornando a leitura inicial dos sensores e repetindo o ciclo, com a condição de que a conexão *WiFi* deve estar ativa (Figura 4).

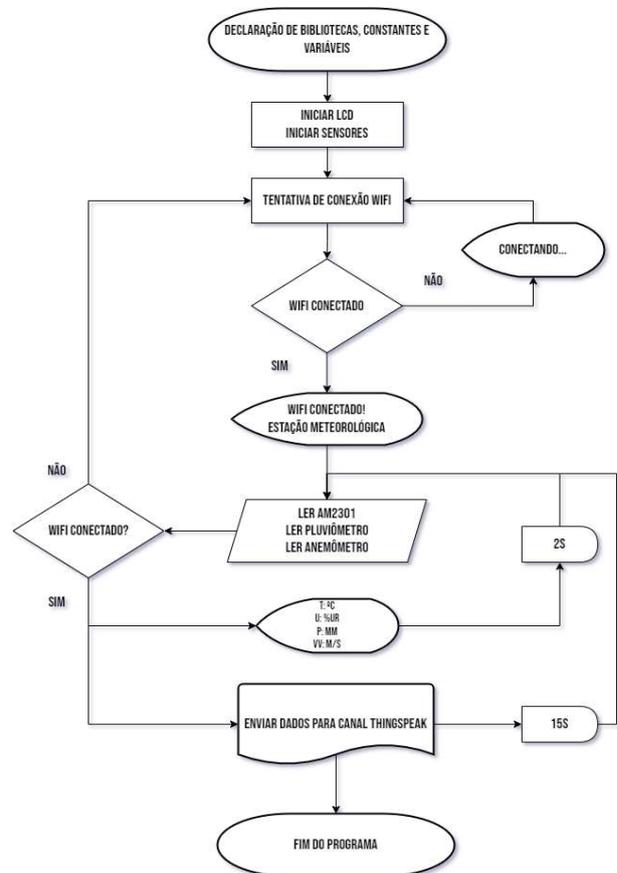


Figura 4. Fluxograma de funcionamento lógico do algoritmo.

Figure 4. Flowchart of the algorithm's logical operation.

### 2.4. Coleta de dados

Para a análise comparativa dos dados obtidos, foram utilizadas as séries históricas adquiridas durante os dias 13/05/2022–14/05/2022, período no qual se constatou uma maior estabilidade na rede de energia e internet interna na qual a estação estava conectada, resultando em perdas de dados mínimas, possibilitando a demonstração de funcionamento da estação sem interrupções significativas. O algoritmo de funcionamento (Figura 2) foi ajustado para coletar informações a cada 1h, conforme a estação automática de referência do INMET, das 00h do dia 13/05/2022 até as 23h do dia 14/05/2022, totalizando 48 medições. Ainda, para sincronizar os dados das estações, dado que a estação desenvolvida opera de acordo com o fuso horário de Belém, se fez necessário o ajuste conforme o horário UTC (Tempo Universal Coordenado) para as amostras do INMET local (UTC -3).

### 2.5. Métodos de análise estatística e indicadores de erro de estimativa residual

Para a comparação dos dados coletados pela estação construída com os dados observados pela estação automática do INMET, foram utilizados métodos de análise estatística, como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Equação 1),

coeficiente de Nash-Sutcliffe (Ef) (Equação 2) e o índice de concordância de Willmott (d) (Equação 3), e os indicadores de erros de estimativa residual Erro Médio Absoluto (MAE) (Equação 4), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (Equação 5) e Percentual Médio de Erro (PBias) (Equação 6). Todos os métodos e indicadores de erro foram processados através do Excel® 2021. Os índices estatísticos foram aplicados exclusivamente às variáveis de temperatura, umidade e velocidade do vento, nos quais para seus respectivos cálculos foram considerados os valores horários instantâneos dessas. Para a variável precipitação se comparou apenas o acumulado horário.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (01)$$

$$Ef = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right] \quad (02)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Y}_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \quad (03)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \times 100 \quad (04)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \times 100 \quad (05)$$

$$PBias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)}{\sum_{i=1}^n (Y_i)} \times 100 \quad (06)$$

em que:  $n$ : é o número de dados;  $\hat{Y}_i$ : são os dados coletados pela estação construída;  $Y_i$ : são os dados observados pela estação do INMET;  $\bar{Y}$ : é a média dos dados observados.

Além dos métodos estatísticos e indicadores de erros utilizados, a análise de desempenho dos sensores em relação aos sensores da estação de referência foi enriquecida com a consulta à literatura especializada. Com base em estudos anteriores, foi elaborada uma classificação dos índices, incluindo categorias como "Muito Bom", "Bom", "Satisfatório", "Ruim" e "Inapropriado".

Essa abordagem, inspirada em trabalhos de Mendoza et al. (2021), Moriasi et al. (2015), Van Liew et al. (2007) e Walstra et al. (1999), proporcionando uma estrutura mais abrangente para avaliar a acurácia e o desempenho dos sensores, destacando os pontos fortes e áreas de melhoria da estação meteorológica automática desenvolvida, conforme a classificação de cada indicativo selecionado.

A Tabela 1 exemplifica a classificação elaborada para cada um dos índices estatísticos e indicadores de erro utilizados no trabalho.

Tabela 1. Classificação dos índices estatísticos e indicadores de erro. Table 1. Classification of statistical indexes and error indicators.

R <sup>2</sup>	Ef	PBias	MAE	RMSE	Classificação
1.00 - 0.75	1.00 - 0.75	≤ ±10	0.00 - 0.20,99	0.00 - 0.20,99	Muito bom
0.74,99 - 0.60	0.74,99 - 0.60	±11 - ±14,99	0.21 - 0.40,99	0.21 - 0.40,99	Bom
0.59,99 - 0.50	0.59,99 - 0.36	±15 - ±24,99	0.41 - 0.70,99	0.41 - 0.70,99	Satisfatório
0.49,99 - 0.25	0.35,99 - 0.01	±25 - ±49,99	0.71 - 1.0	0.71 - 1.0	Ruim
≤ 0.25	≤ 0.00	≥ ±50	> 1.0	> 1.0	Inapropriado

R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; Ef = coeficiente de eficiência; PBias = percentual médio de erro; MAE = erro médio absoluto; RMSE = erro quadrático médio. Fonte: Mendoza et al. (2021); Moriasi et al. (2015); Van Liew et al. (2007); Walstra et al. (1999).

R<sup>2</sup> = determination coefficient; Ef = efficiency coefficient; PBias = average percentage of error; MAE = mean absolut error; RMSE = mean squared error. Source: Mendoza et al. (2021); Moriasi et al. (2015); Van Liew et al. (2007); Walstra et al. (1999).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Análise de consistência das séries obtidas

Para a comparação dos dados coletados pela estação construída com os dados observados pelo INMET no período de 13/05/2022–14/05/2022, foram obtidos valores classificados como ‘Muito Bom’ para o coeficiente de determinação e coeficiente de eficiência da variável temperatura (R<sup>2</sup> = 0,95; Ef = 0,94), com elevados índices de concordância, indicando o bom desempenho do sensor AM2301. Os indicadores de erro obtidos foram classificados como ‘Muito Bom’ (MAE = 2,31; RMSE = 2,73), com percentuais de erro indicando subestimação de aproximadamente 18% dos valores obtidos pela estação construída em relação aos observados pelo INMET (PBias = 18,54), sendo classificado como ‘Satisfatório’ (Figura 5).

De forma análoga à literatura, os valores encontrados para os coeficientes de determinação, concordância e os baixos indicadores de erros para esta variável, com altos índices de eficiência para o sensor AM2301, junto ao percentual de erro, corroboram ao seu bom desempenho, onde o comportamento da série também remete à caracterização climática da área, indicando congruência com

a variabilidade e flutuação detectadas por Alvares et al. (2013a,b).

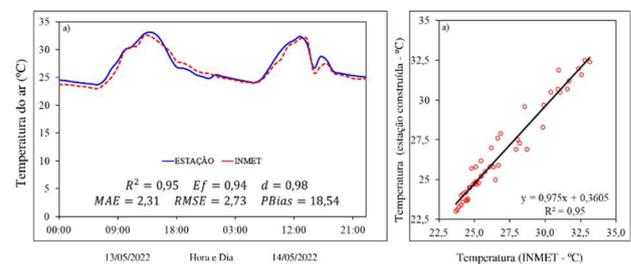


Figura 5. Valores de índices (a) e ajuste linear (b) obtidos pela estação meteorológica construída e pela estação meteorológica automática do INMET para a variável de temperatura no período de 13/05/2022–14/05/2022. R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; Ef = coeficiente de eficiência; d = índice de concordância; MAE = erro médio absoluto; RMSE = raiz do erro quadrático médio; PBias = porcentagem de erro.

Figure 5. Index values (a) and linear fit (b) were obtained by the built meteorological station and by INMET automatic meteorological station for temperature variables in the period 05/13/2022–05/14/2022. R<sup>2</sup> = determination coefficient; Ef = efficiency

coefficient; d = concordance index; MAE = mean absolute error; RMSE = root mean squared error; PBias = percent bias.

No mesmo período, de forma similar à variável de temperatura, se obtiveram valores classificados como ‘Muito Bom’ para o coeficiente de determinação e de eficiência da variável de umidade ( $R^2 = 0,89$ ;  $Ef = 0,76$ ) e um elevado índice de concordância ( $d = 0,94$ ), ressaltando o desempenho do sensor AM2301. Os índices para esta variável se mantiveram na classificação ‘Muito Bom’ ( $MAE = 4,28$ ;  $RMSE = 5,94$ ), todavia, seu percentual de erros foi classificado como ‘Inapropriado’, indicando que mais de 51% da série coletada pela estação construída é subestimada em relação aos dados observados pela estação do INMET ( $PBias = 51,34$ ) (Figura 6). Esta, por sua vez, apesar de apresentar um alto percentual de erros, também demonstrou comportamentos de variabilidade e flutuação coincidentes com a caracterização climática local (ALVARES et al., 2013a,b), conforme evidenciado pela literatura para a área de estudo, assim como a variável de temperatura.

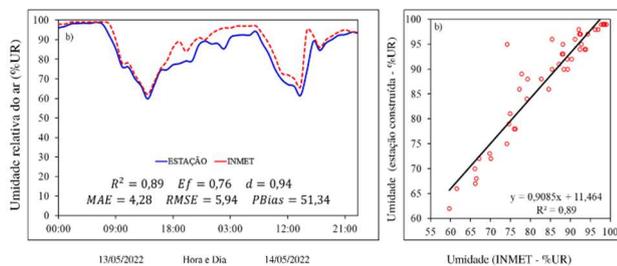


Figura 6. Valores de índices (a) e ajuste linear (b) obtidos pela estação meteorológica construída e pela estação meteorológica automática do INMET para a variável de umidade no período de 13/05/2022–14/05/2022.  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $Ef$  = coeficiente de eficiência;  $d$  = índice de concordância;  $MAE$  = erro médio absoluto;  $RMSE$  = raiz do erro quadrático médio;  $PBias$  = porcentagem de erro.

Figure 6. Index values (a) and linear fit (b) obtained by the built meteorological station and by INMET automatic meteorological station for humidity variable in the period 05/13/2022–05/14/2022.  $R^2$  = determination coefficient;  $Ef$  = efficiency coefficient;  $d$  = concordance index;  $MAE$  = mean absolute error;  $RMSE$  = root mean squared error;  $PBias$  = percent bias.

Quanto a variável de velocidade do vento, para esse mesmo período, todos os valores obtidos foram classificados como ‘Ruim’ ou ‘Inapropriado’ ( $R^2 = 0,03$ ;  $Ef = -0,98$ ;  $MAE = 75,98$ ;  $RMSE = 91,43$ ;  $PBias = 42,33$ ), com exceção do coeficiente de concordância ( $d = 0,51$ ), que indicou um desempenho parcial do sensor SEN0170 (Figura 7). Todavia, este comportamento remete diretamente à sua distribuição espacial e temporal e aos padrões de coleta da estação construída e estação de referência, como localização e elevação, onde também se ressalta sua maior sensibilidade às modificações do ambiente (LOMBARDO, 1985).

Quanto aos ajustes lineares, temos que, principalmente para a variável de velocidade do vento (Figura 7b), a sensibilidade às condições de tempo e o uso e ocupação do solo dos locais nos quais as estações estão instaladas são determinantes na flutuabilidade e comportamento das variáveis, fazendo com que sejam estritamente dependentes desses fatores (CIRINO et al., 2019). As variáveis de temperatura e umidade apresentam maior ajuste pois suas respectivas distribuições espaciais e temporais possuem maior resolução, apresentando um comportamento mais

homogêneo através de uma maior região geográfica (MARENGO et al., 1992).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos índices e indicadores obtidos nesse período para as variáveis de temperatura, umidade e velocidade do vento, juntamente de suas classificações.

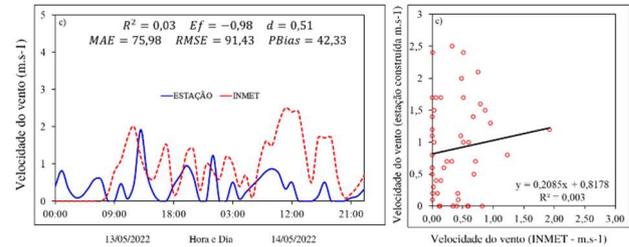


Figura 7. Valores obtidos pela estação meteorológica construída e pela estação meteorológica automática do INMET (linha vermelha) para a variável de velocidade do vento no período de 13/05/2022–14/05/2022.  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $Ef$  = coeficiente de eficiência;  $d$  = índice de concordância;  $MAE$  = erro médio absoluto;  $RMSE$  = raiz do erro quadrático médio;  $PBias$  = porcentagem de erro.

Figure 7. Values were obtained by the built meteorological station and by INMET automatic meteorological station for wind speed variable in the period 05/13/2022–05/14/2022.  $R^2$  = determination coefficient;  $Ef$  = efficiency coefficient;  $d$  = concordance index;  $MAE$  = mean absolute error;  $RMSE$  = root mean squared error;  $PBias$  = percent bias.

Tabela 2. Resumo dos testes aplicados para a comparação dos dados coletados pela estação × dados observados pelo INMET no período de 13/05/2022–14/05/2022.

Table 2. Summary of tests applied to compare data collected by the station × data observed by INMET during 05/13/2022–05/14/2022.

Variável	$R^2$	$Ef$	$d$	$MAE$	$RMSE$	$PBias$
Temperatura	0,95	0,94	0,98	2,31	2,73	18,54
Umidade	0,89	0,76	0,94	4,28	5,94	51,34
Velocidade do Vento	0,03	-0,98	0,50	75,98	91,43	42,33

$R^2$  = coeficiente de determinação;  $Ef$  = coeficiente de eficiência;  $PBias$  = percentual médio de erro;  $MAE$  = erro médio absoluto;  $RMSE$  = erro quadrático médio.

$R^2$  = determination coefficient;  $Ef$  = efficiency coefficient;  $PBias$  = average percentage of error;  $MAE$  = mean absolute error;  $RMSE$  = mean squared error.

Em relação a variável de precipitação, a precipitação acumulada horária registrou o valor máximo de 1,25mm, às 14h do dia 14/05/2022, na estação construída, enquanto o valor máximo registrado pelo INMET foi de 17mm, às 15h do dia 14/05/2022 (Figura 8), concentrando-se na exata faixa identificada como horário de pico desses eventos durante o período mais chuvoso, entre e 14 e 15 de dezembro a maio (BASTOS et al., 2002). A origem desse cenário pode ser associada à característica das chuvas equatoriais, as quais são impulsionadas pelas elevadas temperaturas diurnas, resultando em uma convecção mais intensa (MILLER, 1966). Esse comportamento ressalta, que assim como a variável de velocidade do vento, as leituras para a variável de precipitação também são diretamente afetadas pelas condições de tempo e por sua distribuição espacial e temporal, haja vista que em um espaço de 1h há uma diferença de 15,75mm nos registros da estação do INMET em relação à estação desenvolvida.

Além disso, as variáveis de velocidade do vento e precipitação apresentam correlação negativa, ao passo que quanto maior a concentração de ocorrência de chuvas (Figura 8), menor será a velocidade do vento (Figura 7) em uma dada localidade, o que é visualizado na faixa de horário em que os pluviômetros, tanto da estação construída quanto da estação do INMET, registraram volumes de chuva (BASTOS et al., 2002).

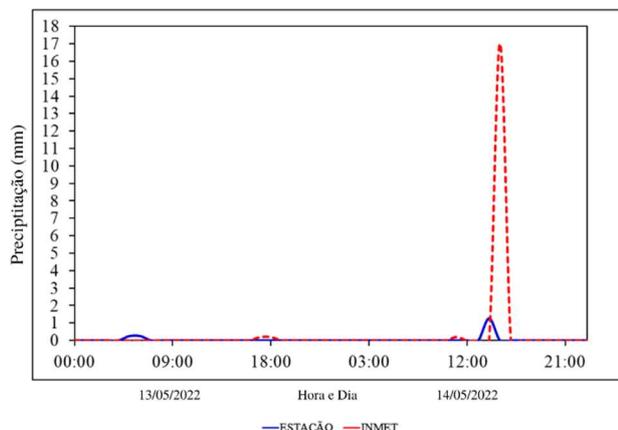


Figura 8. Valores registrados da precipitação no período de 13/05/2022 – 14/05/2022.  
Figure 8. Registered values for precipitation in the period of 05/13/2022 – 05/14/2022.

### 3.2. Utilização da plataforma ThingSpeak para aquisição, visualização e armazenamento de dados

Para a realização do trabalho se utilizou a versão gratuita da plataforma IoT ThingSpeak, na qual o atraso mínimo entre as transmissões dos dados adquiridos para o canal criado é de 15 segundos. Os dados enviados pelo microcontrolador produzem séries históricas que são armazenadas pela plataforma, que pode armazenar até cerca de 3 milhões de mensagens por ano em sua versão gratuita. Esses dados ainda podem ser exportados nos formatos .CSV para tratamento e análise através de *softwares* externos (THE MATHWORKS, INC, 2024).

Para a visualização das séries produzidas, se utilizou a ferramenta “MATLAB Visualization”, disponibilizada pela própria plataforma, na qual o usuário é capaz de implementar algoritmos baseados na linguagem de programação MATLAB responsáveis por criar visualizações personalizadas consumindo os dados adquiridos e armazenados. Assim, se implementou um algoritmo que utilizasse as séries armazenadas das variáveis observadas para produzir gráficos nos quais são exibidos os valores de leitura das últimas 24h (Figura 9).

Além da personalização realizada, a visualização ainda pode ser customizada de acordo com os interesses do proprietário, onde podem ser utilizados ajustes conforme *templates* padrões da plataforma, como a visualização dos dados em determinada escala de tempo ou em medidas de tendência como média e mediana, a adição de medidores e *displays* numéricos. Ainda é possível adicionar widgets que indiquem a localização geográfica do canal e vídeos de apresentação hospedados no YouTube ou Vimeo, por exemplo, juntamente a ações ordenadas pelo usuário capazes de emitir alertas, realizar ações agendadas ou de acordo com o determinado tipo ou padrão de dado lido por uma ou mais das variáveis, colocar o dispositivo em estado de espera e providenciar a comunicação com serviços *web* e APIs (*Application Programming Interface*).



Figura 9. Visualização do canal na plataforma ThingSpeak.  
Figure 9. Visualization of the channel in the ThingSpeak platform.

### 3.3 Orçamento

Para se realizar tal comparação, foi tomado como referência o período de maio/2022, onde se utilizou a cotação vigente no dia 25/05/2022 para as moedas Real brasileiro (BRL) e Dólar americano (USD), sendo que, na data em questão, às 17h00, o USD equivalia a 4,821 BRL. O levantamento dos preços de cada componente foi realizado através de pesquisa na internet, consultando sites especializados na venda de componentes eletrônicos como: FilipeFlop, Robocore, Autocore, Usainainfo e Eletrogate. Todos os componentes utilizados na construção da estação e descritos na subseção de caracterização do sistema embarcado estão compilados na Tabela 3 com seus respectivos preços e preço total, considerando possíveis taxas de frete, em BRL e USD para o período em que foi realizado o levantamento dos preços. Os principais componentes são ilustrados na Figura 10.

Tabela 3. Componentes utilizados na construção da estação e seus respectivos preços em BRL e USD.

Table 3. Used components in constructing the stations and their respective prices in BRL and USD.

Componentes	Preço (BRL)	Preço (USD)
Solda de estanho	10,00	2,07
Placa de fenolite	15,00	3,11
Bateria Li-íon 18650	26,23	5,44
LCD I2C	39,90	8,28
TP4056	63,37	13,14
Caixa hermética IP65	67,08	13,91
Módulo fotovoltaico	74,90	15,54
ESP8266 NodeMCU V3	81,61	16,93
XL6009	118,32	24,54
Anemômetro SEN0170	231,57	48,03
Pluviômetro de Bâscula PB10	394,25	81,78
Sensor de Temperatura e Umidade	615,62	127,70
<b>Total</b>	<b>1735,85</b>	<b>360,46</b>

Para o escopo do projeto e possíveis aplicações da estação desenvolvida é imprescindível que o levantamento de preços seja realizado, permitindo a comparação com preços futuros e análise de viabilidade, permitindo, assim, que a replicação ou adaptação deste possa ter bases claras de referência, tanto em questão de valores monetários, quanto de possíveis fontes de fornecimento.



Figura 10. Principais componentes de estação meteorológica automática embarcada.

Figure 10. Main components of the embedded automatic weather station.

#### 4. DISCUSSÃO

As amplitudes encontradas para as séries obtidas para as variáveis de temperatura e umidade podem ser explicadas através da relação estrita da localização do município com a climatologia atmosférica nas escalas interanuais e intrasazonais, onde atuam sobre Belém o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os quais podem ocasionar em anomalias de precipitação e maiores temperaturas do ar durante as estações menos chuvosas (VITORINO, 2002; MARENGO, 1992). Além disso, devem se considerar as características dos pontos de localização das estações, de onde se denota a influência da expansão urbana, adensamento de áreas construídas, impermeabilização do solo, supressão da vegetação e concentração de gases (SILVA FILHO et al., 2019), os quais elevam os valores de temperatura e aumentam a amplitude da umidade, resultando no fenômeno das ICs (BEZERRA et al., 2018), alterando o padrão de absorção e taxa de albedo devido as grandes quantidades de insolação que a cidade recebe por estar localizada próxima à linha do Equador (CIRINO et al., 2019).

A variável de velocidade do vento apresenta os piores índices, causado por fatores diversos, dos quais se destacam uma maior sensibilidade à distribuição espacial e temporal, às mudanças do uso e ocupação do solo e sua correlação negativa com a concentração de chuvas (BASTOS et al., 2002). Isso faz com que os dados observados pela estação do INMET para essa variável não sejam representativos quanto a área na qual a estação desenvolvida coletou dados, devido sua menor resolução, fazendo com que isso influencie nos índices juntamente aos erros de acurácia do sensor SEN0170.

Ainda, temos leituras de precipitação que remetem aos pressupostos definidos na caracterização da área, denotando o comportamento da variável e a amplitude das séries da estação construída e a estação do INMET, considerando que

as coletas foram realizadas no período tido como transitório entre estação chuvosa e menos chuvosa, onde as chuvas ocorrem predominantemente no período vespertino com menor distribuição temporal e espacial devido à efeitos advindos da ação dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) (VIANELLO; ALVES, 1991), o que se percebe na Figura 8 onde a estação construída registra valores de precipitação na mesma faixa horária dos registros da estação do INMET, mas com variações de volume altamente discrepantes devido a sua distribuição espacial e temporal reduzida (NECHET, 1997). Ressalta-se, também, a influência dessa variável no comportamento da variável de velocidade do vento, as quais possuem uma acentuada correlação negativa (BASTOS et al., 2002).

No geral, através de metodologia adotada para o presente trabalho foi possível perceber que o desempenho dos sensores é relativo à representatividade dos dados. Verifica-se tal afirmação a partir dos índices obtidos para as variáveis de temperatura e umidade, que apresentaram valores bem classificados para todos os índices, com exceção do PBias da umidade, enquanto a variável de velocidade do vento apresentou apenas índices mal classificados. Isso reflete diretamente a distribuição espacial e temporal dessas variáveis, denotando que os dados das variáveis de temperatura e umidade conseguem representar uma área maior, enquanto a área abrangida pela variável de velocidade é mais restringida. A variável de precipitação, que exige uma análise diferente das demais dentro do proposto, apresenta comportamento análogo e correlato à variável de velocidade do vento, exemplificando como o comportamento de uma variável pode depender do padrão de outra.

Por fim, é importante enfatizar que os dados considerados na análise, devido ao espaço de tempo, juntamente à distância entre os pontos de coleta não são suficientemente representativos para uma validação efetiva da estação desenvolvida. Para tanto, se faz necessário um espaço amostral maior e que contemple diferentes períodos do ano, além da proximidade entre as estações meteorológicas.

#### 5. CONCLUSÕES

Os resultados encontrados através da análise estatística e indicadores de erros de estimativa residual apresentaram valores classificados como 'Muito bom' e 'Bom', em sua maior parte, para as variáveis de temperatura e umidade, embora tenha sido encontrado valor de PBias inadequado para a variável de umidade, dizendo respeito a subestimação dos dados pelo sensor, ainda assim os seus respectivos comportamentos remeteram à climatologia atmosférica e a flutuação característica para elas dentro da área de estudo. A variável de velocidade do vento apresentou resultados indicando incongruências acentuadas entre as séries coletadas e observadas, o qual se deve à sua distribuição espacial e temporal de resolução reduzida em relação às variáveis de temperatura e umidade, se inferindo, também, uma sensibilidade maior às modificações do ambiente. Quanto a variável de precipitação, as séries foram coerentes com pressupostos característicos encontrados na literatura para a área de estudo, além de demonstrar, em segundo plano, a correlação dessa variável com a variável de velocidade do vento.

Portanto, é relevante frisar que a validade dos índices encontrados e a acurácia dos sensores da estação

desenvolvida em relação a estação de referência do INMET possui maior fundamento literário quanto às variáveis de temperatura e umidade. Por outro lado, temos que os mesmos parâmetros são, praticamente, inválidos quanto às variáveis de velocidade do vento e precipitação, embora os resultados encontrados sublinhem padrões igualmente embasados pela literatura.

Quanto à utilização da plataforma ThingSpeak para aquisição, visualização e armazenamento dos dados obtidos, temos que o acervo de ferramentas e funcionalidades oferecidas lhe assegura como uma aplicação versátil e oportuna ao intento do trabalho, mesmo através da versão gratuita utilizada.

A vertente orçamentária do projeto, na qual se considerou o investimento em todos os componentes utilizados para a construção da estação, representou aproximadamente 6,5% do preço total dos sensores de referência, contemplando o objetivo de providenciar um produto de baixo custo e fácil acesso, assinalando uma alternativa viável em aplicações de curto prazo ou quando não há opções de tecnologia de maior robustez e precisão disponíveis. Contudo, é importante salientar que a degradação desses componentes em comparação à tecnologia convencionalmente utilizada no monitoramento meteorológico, apesar de apresentarem desempenho aproveitável, é pode ser significativamente maior, fazendo com que o escopo do projeto seja determinante em suas respectivas utilizações, considerando seus pontos positivos e negativos.

Não obstante, para trabalhos futuros recomenda-se refinar a base metodológica utilizada, a fim de reduzir os erros encontrados para somente o erro instrumental, através do confinamento da estação desenvolvida ao mesmo ponto geográfico de uma estação meteorológica automática de erro conhecido. Por último, é necessário que o espaço amostral seja ampliado, fazendo com que juntamente ao confinamento geográfico, as amostras sejam precisamente significativas à área de estudo, a fim de validar o funcionamento da estação desenvolvida através da identificação da real acurácia de cada sensor.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013a. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 113, n. 3-4, p. 407-427, 2013b. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0796-6>
- BAJRAMI, X.; MURTURI, I. An efficient approach to monitoring environmental conditions using a wireless sensor network and NodeMCU. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, v. 135, n. 3, p. 294-301, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00502-018-0612-9>
- BASTOS, T. X.; PACHECO, N. A.; NECHET, D.; SÁ, T. D. A. *Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002. 31p. (Documentos, 128)
- BEZERRA, P. E. S.; MORAES, E. T. I.; SOARES, I. R. C. Análise da temperatura de superfície e do índice de vegetação no município de Belém na identificação das ilhas de calor. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 70, n. 13, p. 803-818, 2018. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n3-45701>
- CIRINO, L. S.; VITORINO, M. I.; DE HOLANDA, B. S. Análise climática da variabilidade natural e antrópica para uma metrópole amazônica. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, v. 6, n. 2, p. 3-26, 2019.
- COULBY, G.; CLEAR, A. K.; JONES, O.; GODFREY, A. Low-cost, multimodal environmental monitoring based on the Internet of Things. *Building and Environment*, v. 203, e108014, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108014>
- ELIAS, A. A. A.; SILVA, J. C. P.; GONÇALVES, R. N.; SILVA-DE-SOUZA, T. Ardweather: uma estação meteorológica baseada no Arduino e em Web Services Restful. In: SAFETY HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS (SHEWC), 2014. *Anais...* Cubatão: COPEC, 2014. P. 44-48. Disponível em: <https://doi.org/10.14684/shewc.14.2014.44-48>
- IBGE\_Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. *Cidades*. Rio de Janeiro – RJ, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama>. Acesso em: 28 de abr. 2022.
- FONSECA, A. C. F.; GUEDES, J. A.; SILVA, L. S. T.; SILVA, M. V. S. Mapeamento das áreas sujeitas a inundações no distrito administrativo D'água, município de Belém, por meio de técnicas de geoprocessamento. In: CONGRESSO DE CADASTRO MULTIFINALITÁRIO E GESTÃO TERRITORIAL (COBRAC), 2018. *Anais...* Florianópolis: UFSC, 2018. 10p.
- GUIMARÃES, R. J. P. S.; RABELA, T.; CATETE, C. P.; ALVES, P. P. A.; SILVA, R. C. Georreferenciamento dos pontos de alagamento em Belém (PA). In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2017. *Anais...* São Paulo: ABES, 2017. 7p.
- KHATUA, P. K.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; KASINATHAN, P.; YONG, J. Y.; PASUPULETI, J.; RAJAGOPALAN, A. Application and assessment of internet of things toward the sustainability of energy systems: challenges and issues. *Sustainable Cities and Society*, v. 53, e101957, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101957>
- KONDAVEETI, H. K.; KUMARAVELU, N. K.; VANAMBATHINA, S. D.; MATHE, S. E.; VAPPANGI, S. A systematic literature review on prototyping with Arduino: applications, challenges, advantages and limitations. *Computer Science Review*, v. 40, e100364, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100364>
- LOMBARDO, M. A. *Ilhas de Calor nas Metrôpoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo: Hucitec, 1985. 224p.
- MARENCO, J. A. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, v. 12, n. 8, p. 853-863, 1992. <https://doi.org/10.1002/joc.3370120808>
- MILLER, A. A. *Climatologia*. 3 ed. Barcelona: OMEGA, 1966. 379p.
- MORÓN, C.; DIAZ, J. P.; FERRÁNDEZ, D.; SAIZ, P. Design, development and implementation of a weather

- station prototype for renewable energy systems. **Energies**, v. 11, n. 9, e2234, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11092234>
- MOTA, W. N.; ALVES JUNIOR, J.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. SMUT – Sistema de baixo custo para aquisição de temperatura e umidade relativa do ar para manejo de irrigação. **Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 1, p. 89-99, 2018. <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i1.897>
- NECHET, D. Análise da precipitação em Belém-PA, de 1896 a 1991. **Boletim de Geografia Teórica**, v.23, n. 45/46, p. 150-156, 1993.
- NIŽETIĆ, S.; ŠOLIĆ, P.; GONZÁLEZ-DE-ARTAZA, D. L-D-I; PATRONO, L. Internet of Things (IoT): opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, e122877, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>
- PONTES, M. L. C.; LIMA, A. M. M.; SILVA JÚNIOR, J. A.; SADECK, C. C. A. Dinâmica das áreas de várzea do município de Belém/PA e a influência da precipitação pluviométrica na formação de pontos alagamentos. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 49, p. 285-303, 2017. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27n49p285>
- SANTOS, T. F.; FERREIRA, V. H. Building a low-cost weather station. **IEEE Potentials**, v. 39, n. 5, p. 35-40, 2020. <http://dx.doi.org/10.1109/MPOT.2018.2869918>
- SILVA FILHO, A.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; QUERINO, C. A. S.; ALMEIDA JÚNIOR, E. S. Estimativa do balanço de energia pelo método da razão de Bowen a partir de medidas de protótipo de estação micrometeorológica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 134-150, 2019. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v24i0.59271>
- SOARES, A. A. S.; CARVALHO, A. C. Desafios da governança do espaço urbano na era do antropoceno, e o caso das inundações e alagamentos em Belém – PA. **Revista GeoAmazônia**, v. 6, n. 11, p. 105-142, 2018. <http://dx.doi.org/10.18542/geo.v6i11.12514>
- STRIGARO, D.; CANNATA, M.; ANTONOVIC, M. Boosting a weather monitoring system in low income economies using open and non-conventional systems: data quality analysis. **Sensors**, v. 19, n. 5, e1185, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19051185>
- THE MATHWORKS, INC. ThingSpeak – The IoT Platform with MATLAB Analytics. **Help Center**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/thingspeak/>>. Acesso em: 26/05/2022.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. 449p.
- VITORINO, M. I. **Análise das oscilações intrasazonais sobre a América do Sul e Oceanos Adjacentes utilizando a análise de ondas**. 344f. Tese [Doutorado em Meteorologia] – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.
- YE, Y.; WANG, Q.; WANG, J. Green city air monitoring and architectural digital art design based on IoT embedded system. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, e101717, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101717>

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao Laboratório de Eletrônica Aplicada do Núcleo de Sistemas Ciberfísicos e o Grupo de Pesquisa Interação Solo-Planta-Atmosfera na Amazônia da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a CAPES pelo suporte de desenvolvimento científico da pesquisa.

**Contribuição dos autores:** J.L.P.A.: coleta e análise de dados, redação de texto, metodologia (esboço original, revisão e edição); C.C.R.: auxílio com o Arduino e preparação do protótipo; O.A.C.: revisão do texto; K.P.S.: redação e edição do texto; H.G.G.C.N.: conceituação, coleta e análise de dados; A.T.M.B.: supervisão, aquisição de financiamento, conceituação, metodologia e análise estatística. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Financiamento:** Apoio do projeto de Pesquisa n. PICE236-2020 “Desenvolvimento de protótipos sustentáveis com o uso de Arduino aplicados ao meio ambiente”.

**Revisão por comitê institucional:** *Não se aplica.*

**Comitê de Ética:** *Não se aplica.*

**Disponibilização de dados:** **Contribuição dos autores:** Os dados do estudo podem ser obtidos mediante solicitação via e-mail ao autor correspondente.

**Conflito de interesses:** Os autores declaram não haver conflito de interesses. As entidades de apoio não tiveram qualquer papel na concepção do estudo; na coleta, análise ou interpretação de dados; na redação do manuscrito ou na decisão de publicação dos resultados.