

DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA EMBARCADA BASEADA EM TECNOLOGIA IOT



<https://doi.org/10.22533/at.ed.6541125260210>

Data de aceite: 15/10/2025

João Luiz Pontes de Araújo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-1619-5995>

Katiane Pereira da Silva

Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil.
<https://orcid.org/0000-0001-7864-6467>

Hildo Giuseppe Garcia Caldas Nunes

Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil
<https://orcid.org/0000-0003-4072-003X>

Antonio Thiago Madeira Beirão

Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil
<https://orcid.org/0000-0003-1366-5995>

RESUMO: A fim de oferecer uma alternativa em relação aos métodos e tecnologia classicamente utilizados na aquisição de dados meteorológicos, este artigo objetivou o desenvolvimento e validação de uma estação meteorológica automática embarcada com a utilização da plataforma *IoT* ThingSpeak no município de Belém – PA. Para a aquisição dados de temperatura,

umidade, velocidade do vento e precipitação foram utilizados o sensor de temperatura e umidade AM2301, o anemômetro SEN0170 e um pluviômetro de báscula, com o armazenamento e visualização dos dados adquiridos sendo feitos através da plataforma ThingSpeak. Para se inferir a confiabilidade dos dados obtidos pelos sensores utilizados, foram aplicados métodos de análise estatística e indicadores de erro de estimativa residual. Os valores encontrados para os índices obtidos foram classificados, em sua maioria, como ‘Muito Bom’ e ‘Bom’, validando a funcionalidade da estação, ainda considerando que nos valores de índices desfavoráveis estejam embutidos os erros instrumentais dos sensores e da distribuição espacial e temporal das variáveis observadas, não podendo se inferir tais erros somente aos sensores, sugerindo aproximações metodológicas que reduzem os erros somente ao erro instrumental.

PALAVRAS-CHAVE: meteorologia, microcontroladores, Internet das Coisas.

DEVELOPMENT, IMPLEMENTATION AND VALIDATION OF AN AUTOMATIC BOARDED WEATHER STATION BASED ON IOT TECHNOLOGY

ABSTRACT: In order to offer an alternative in relation to the methods and technology classically used in the acquisition of meteorological data, this article aimed to develop and validate an embedded automatic weather station using the IoT platform ThingSpeak platform in the city of Belém - PA. For the acquisition of temperature, humidity, wind speed and precipitation data, the AM2301 temperature and humidity sensor, the SEN0170 anemometer and a tipping bucket rain gauge were used, with the storage and visualization of the acquired data being done through the ThingSpeak platform. To infer the reliability of the data obtained by the sensors used, statistical analysis methods and residual estimation error indicators were applied. The values found for the obtained indices were classified, for the most part, as 'Very Good' and 'Good', validating the functionality of the station, even considering that the values of unfavorable indices include the instrumental errors of the sensors and the spatial and temporal distribution of the observed variables, such errors cannot be inferred only to the sensors, suggesting methodological approximations that reduce the errors only to the instrumental error.

KEYWORDS: meteorology, microcontrollers, Internet of Things.

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 homogeneidade espacial e sazonal de precipitação, apresentando dois tipos de variação apresentados durante o ano, que são denominados como super úmido e úmido, caracterizados pela alta e baixa precipitação, respectivamente (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 sob 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, onde se destaca o emprego do conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*).

Concatenando a conceituação realizada, a literatura apresenta um vasto acervo de estudos e pesquisas para embasar a ideiação 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 plataforma de prototipagem NodeMCU, 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) 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 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 Santos 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 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. Ainda, pode 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, fácil manutenção e baseada em energias limpas e renováveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudos

O município de Belém (01°28'S, 48°29'W) é a capital do Estado do Pará, classificado como Metrópole (1C), estabelecido na mesorregião Metropolitana de Belém, pertencente ao Sistema Costeiro-Marinho e situado no bioma Amazônia, possuindo 1.059,466 km² de extensão (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 próximo à área do Grupo de Pesquisa Interação Solo-Planta-Atmosfera (ISPAAm) e do Laboratório de Agrometeorologia, na Universidade Federal Rural da Amazônia (Ufra), caracterizado pela baixa densidade de construções e vegetação preservada nas circunvizinhanças. A estação automática do INMET da qual foram obtidos os dados para a comparação se encontra a aproximadamente 5,2 Km de distância do ponto de coleta, 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 junto do erro instrumental e das distribuições espaciais e temporais das variáveis observadas na (Figura 1).

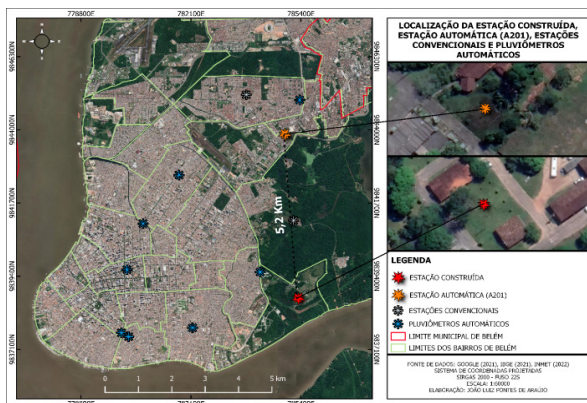


Figura 1. Mapa de localização dos pontos de coleta, estações convencionais, estações automáticas e pluviômetros automáticos dentro da área de estudo.

Fonte: autores, 2023.

Caracterização do sistema embarcado

A estação construída tem como principal componente a placa de prototipagem NodeMCU V3, a qual tem conectada a si o anemômetro SEN0170, para medições de velocidade do vento, um Pluviômetro de Bâscula, para medições de precipitação, o sensor de temperatura e umidade AM2301, para medições de temperatura do ar e umidade relativa do ar e um display LCD I2C para a visualização em tempo real das variáveis observadas.

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. Cabos *jumper* foram utilizados, mas igualmente soldados à placa (Figura 2).

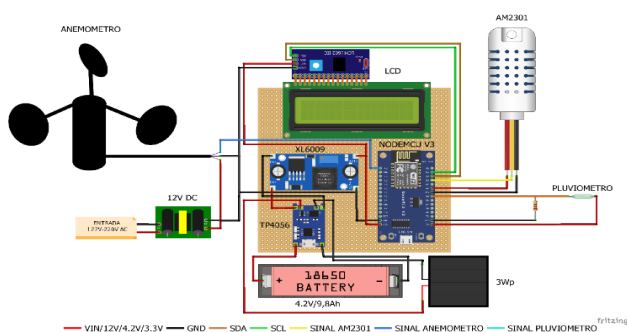


Figura 2. Componentes do sistema da estação e estrutura de conexões entre placa microcontroladora, sensores e sistema de potência.

Fonte: autores, 2023.

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 à uma entrada 127-220V AC, compartilhando a fase neutra com o restante do sistema embarcado.

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 da IDE Arduino, 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 pelos sensores, para uma grandeza compatível com a variável observada através da interpretação lógica dos sinais recebidos.

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*, logo após realizando 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 para o canal na plataforma ThingSpeak a cada 15s, retornando a leitura inicial dos sensores e repetindo o ciclo, com a condição de que a conexão *WiFi* deve estar ativa. A Figura 3 ilustra um fluxograma de funcionamento lógico do algoritmo.

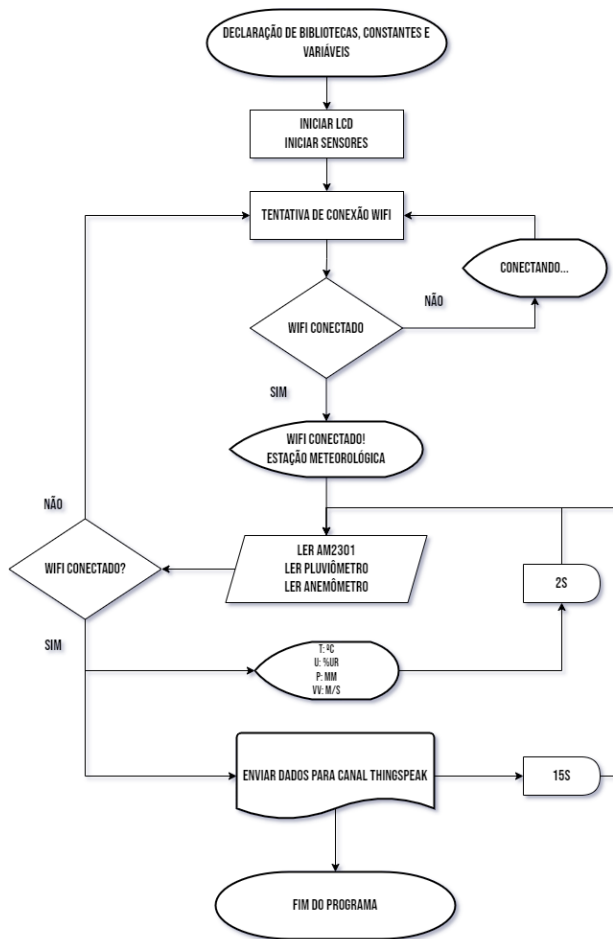


Figura 3. Fluxograma de funcionamento lógico do algoritmo.

Fonte: autores, 2023.

Análise estatística dos dados coletados e dados observados

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), índice de concordância de Wilmott (d) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (E_f), e os indicadores de erros de estimativa residual Erro Médio Absoluto (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Percentual Médio de Erro (PBias). Todos os métodos e indicadores de erro foram processados através do Excel® 2021.

Para se obter uma melhor descrição do desempenho dos sensores avaliados, foram utilizadas classificações pertinentes dos índices de acordo com o encontrado na literatura, a fim de se obter uma dimensão de suas respectivas simulações em relação às séries observadas de referência (Tabela 1).

Para a análise de consistência dos dados obtidos, foram utilizadas as séries históricas adquiridas durante os dias 13/05/2022–14/05/2022, respectivamente. As séries de dados adquiridas e armazenadas na plataforma ThingSpeak foram tratadas de modo que para o cálculo dos índices estatísticos considerou os valores horários instantâneos de temperatura, umidade, velocidade do vento e acumulado de precipitação para se comparar com os dados observados pelo INMET.

As séries de dados utilizadas para a comparação foram observadas pela estação meteorológica automática de propriedade do INMET (A201 – Lat -1.411228; Long -48.439512) com uma altitude de 21,17 m e encontra-se em situação operante.

R²	Ef	PBias	MAE	RMSE	Classificação
$0.75 < R^2 \leq 1.00$	$0.75 < Ef \leq 1.00$	$PBias \leq \pm 10$	$0.00 \leq MAE \leq 0.20$	$0.00 \leq RMSE \leq 0.20$	Muito bom
$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$0.60 < Ef \leq 0.75$	$\pm 10 < PBias \leq \pm 15$	$0.20 \leq MAE < 0.40$	$0.20 \leq RMSE \leq 0.40$	Bom
$0.50 < R^2 \leq 0.60$	$0.36 < Ef \leq 0.60$	$\pm 15 < PBias \leq \pm 25$	$0.40 \leq MAE < 0.70$	$0.40 \leq RMSE \leq 0.70$	Satisfatório
$0.25 < R^2 \leq 0.50$	$0.00 < Ef \leq 0.36$	$\pm 25 < PBias \leq \pm 50$	$0.7 \leq MAE < 1.0$	$0.7 \leq RMSE < 1.0$	Ruim
$R^2 \leq 0.25$	$Ef \leq 0.00$	$\pm 50 \leq PBias$	$MAE > 1.0$	$RMSE > 1.0$	Inapropriado

R² = coeficiente de determinação; Ef = coeficiente de eficiência; PBias = percentual médio de erro; MAE = erro médio absoluto; RMSE = erro quadrático médio.

Tabela 1. Classificação dos índices estatísticos e indicadores de erro. Fonte: autores, 2023.

Fonte: autores, 2023.

RESULTADOS

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 ($R^2 = 0,95$; $Ef = 0,94$), 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 4).

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. (2013), Alvares et al. (2014).

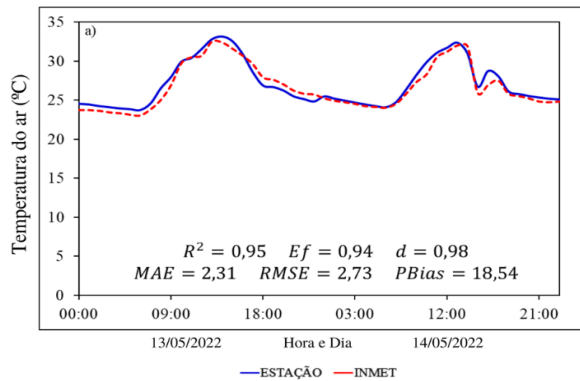


Figura 4. Valores obtidos pela estação meteorológica construída (linha azul) e pela estação meteorológica automática do INMET (linha vermelha) para a variável de temperatura no período de 13/05/2022–14/05/2022. R^2 = coeficiente de determinação; Ef = coeficiente de eficiência; d = índice de concordância; MAE = erro médio absoluto; RMSE = raiz do erro quadrático médio; PBias = porcentagem de erro.

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 5).

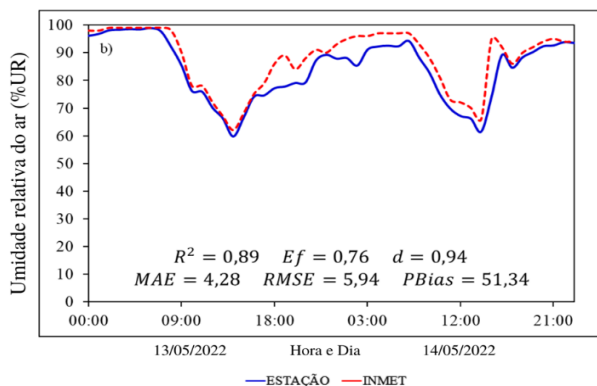


Figura 5. Valores obtidos pela estação meteorológica construída (linha azul) e pela estação meteorológica automática do INMET (linha vermelha) para a variável de umidade no período de 13/05/2022–14/05/2022. R^2 = coeficiente de determinação; Ef = coeficiente de eficiência; d = índice de concordância; MAE = erro médio absoluto; RMSE = raiz do erro quadrático médio; PBias = porcentagem de erro.

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., 2013; ALVARES et al., 2014), conforme evidenciado pela literatura para a área de estudo, assim como a variável de temperatura.

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 6). 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).

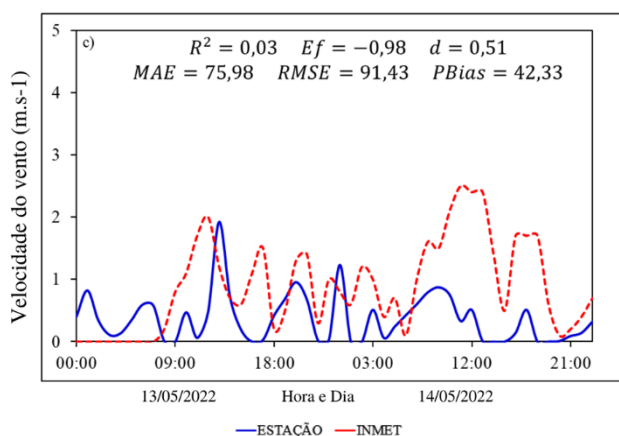


Figura 6. Valores obtidos pela estação meteorológica construída (linha azul) e pela estação meteorológica automática do INMET (linha vermelha) para a variável de velocidade do vento no período de 13/05/2022–14/05/2022. R^2 = coeficiente de determinação; Ef = coeficiente de eficiência; d = índice de concordância;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

Para os resultados obtidos, na Figura 7 apresentamos o ajuste dos dados coletados pelos sensores da estação construída com os sensores da estação do INMET. Esses ajustes (Figura 7), principalmente para a variável de velocidade do vento (Figura 7c), são dependentes e tem relação com as condições de tempo a estação construída se encontra posicionada, demonstrando suas respectivas flutuações e sensibilidades.

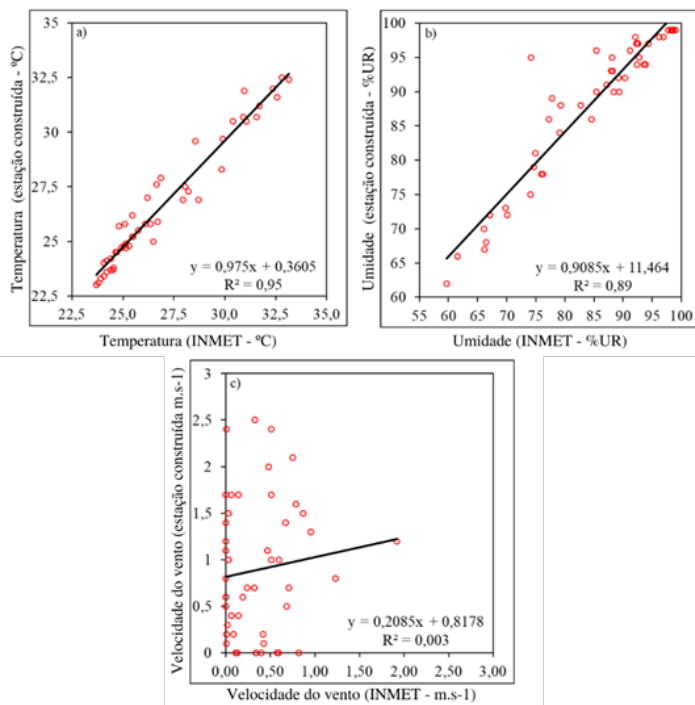


Figura 7. Ajuste dos dados coletados pelos sensores da estação construída com os sensores da estação do INMET no período de no período de 13/05/2022–14/05/2022. R^2 = coeficiente de determinação.

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

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

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.

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

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).

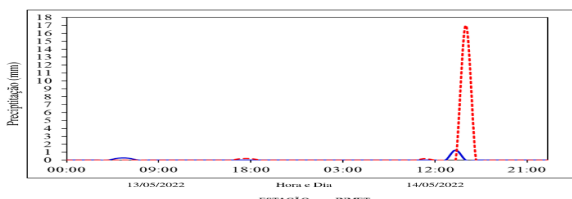


Figura 8. Valores registrados da precipitação no período de 13/05/2022 – 14/05/2022.

A partir da comparação dos valores de precipitação obtidos pela estação construída com os valores observados pela estação do INMET, nesse primeiro período, é possível visualizar os efeitos da distribuição espacial e temporal dessa variável. Percebe-se que a estação construída registra valores de precipitação em horários anteriores/posteriores aos registros realizados pela estação do INMET, todavia, com notáveis diferenças nos volumes.

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

Para a realização do projeto se utilizou a versão gratuita da plataforma 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 a visualização gráfica de uma série histórica, a qual é armazenada e pode ser exportada no formato CSV, para análise e tratamento por softwares externos. As Figura 9 e Figura 10 ilustram a visualização pública das informações no canal de comunicação na plataforma.



Figura 9. Visualização pública do canal na plataforma ThingSpeak.

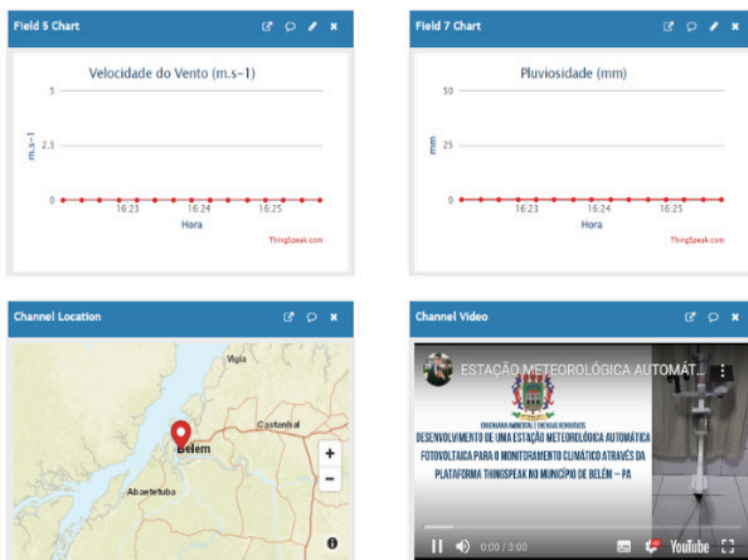


Figura 10. Visualização pública do canal na plataforma ThingSpeak.

A visualização pode ser customizada de acordo com os interesses do proprietário, onde podem ser utilizados ajustes disponibilizados pela plataforma, como a visualização dos dados em determinada escala de tempo ou em medidas de tendência central calculadas pela plataforma como média e mediana, a adição de medidores e displays numéricos, indicando a situação das variáveis que recebe de acordo com a designação assinalada pelo usuário em seu algoritmo ou nas opções de canal, além de widgets que indiquem a localização geográfica do canal e vídeos de apresentação hospedados no YouTube ou Vimeo, por exemplo.

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, Usinainfo e Eletrogate. Todos os componentes utilizados na construção da estação e descritos na seção de material e métodos 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.

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
NodeMCU V3	81,61	16,93
XL6009	118,32	24,54
Anemômetro SEN0170	231,57	48,03
Pluviômetro de báscula	394,25	81,78
AM2301 + Abrigo meteorológico	615,62	127,70
Total	1735,85	360,46

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

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 Nino 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).

Levando em consideração os registros do período de dados coletados, 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 ainda 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 SCMs (SOUZA & NISHIZIMA, 2019; VIANELLO & ALVES, 1991), o que se percebe na Figura 8 onde a estação construída registra valores de precipitação em horários anteriores/posteriores aos registros da estação do INMET, mas com variações notáveis nos volumes.

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 tenham sido encontrados percentuais de erros inadequados, os quais remetem 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 e padrões de coleta, onde se também se infere uma sensibilidade maior às modificações do ambiente. Quanto a variável de precipitação, as séries coletadas e observadas também remeteram aos pressupostos definidos na caracterização da área de estudo.

Todavia, há de se considerar que, para todas as variáveis observadas, estão embutidos nas análises estatísticas e indicadores de erros não somente o erro instrumental, mas também os efeitos da distribuição espacial e temporal das variáveis dentro da área de estudo, fazendo com que não seja possível inferir as negativas dos resultados exclusivamente aos sensores utilizados.

Quanto à utilização da plataforma ThingSpeak para aquisição, visualização e armazenamento dos dados obtidos, temos que a versatilidade oferecida lhe assegura como uma ferramenta de apoio de forma consistente, com ampla e favorável aplicação ao intento do protótipo mesmo através de sua versão gratuita, seja por meio de seu domínio oficial ou aplicativos móveis de terceiros.

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 nesse quesito.

Sumarizando os resultados encontrados, constata-se a validação do funcionamento do protótipo desenvolvido, sendo pertinente que se considere os pontos positivos e negativos identificados em perspectivas para trabalhos futuros, a fim de refinar a proposta e ampliar a gama de aplicações e possibilidades para as quais o trabalho pode ser reproduzido através da base metodológica estabelecida.

Para trabalhos futuros se recomendam aproximações metodológicas que reduzam os erros identificados através das análises estatísticas e indicadores para somente o erro instrumental dos sensores utilizados. Para tanto, devem ser adotados os mesmos padrões de coleta das estações de referência a serem comparadas, no qual o principal é estar situada no mesmo ponto geográfico, onde se infere que as variáveis mais sensíveis à distribuição espacial e temporal obtenham melhores coeficientes de correlação e índices de erros atenuados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Eletrônica Aplicada do Núcleo de Sistemas Ciberfísicos 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.

REFERÊNCIAS

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, 2013.

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, 2014.

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, 25 jun. 2018.

- 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, 2018.
- 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 (RBIC)**, v. 6, n. 2, p. 3-26, abr/jun., 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, p. 108014, out. 2021.
- 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. **Conference: Safety Health and Environment World Congress - SHEWC 2014**, jul. 2014.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **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. **COBRAC - Congresso de Cadastro Multifinalitário e Gestão Territorial**. 2018.
- 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). **Anais do Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, 2017.
- 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, p. 101957, fev. 2020.
- 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, n. 1574-0137, p. 100364, maio 2021.
- LOMBARDO, M. A. **Ilhas de Calor nas Metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec. 1985. 224 p.
- MARENGO, J. A. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. **International Journal of Climatology**, 12 (8), 853-863, 1992.
- 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, p. 2234, 26 ago. 2018.
- 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. **Revista Engenharia Na Agricultura - REVENG**, v. 26, n. 1, p. 89–99, 23 fev. 2018.
- 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, p. 122877, nov. 2020.

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, [S.L.]**, v. 27, n. 49, p. 285, 2 maio 2017. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. <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, set. 2020.

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, [S.I.]**, v. 24, maio 2019. ISSN 2237-8642.

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**, Belém, v. 6, n. 11, p. 105-142, out. 2018.

SOUZA, G. G. B.; NISHIZIMA, M. L. Estudo da Caracterização Climática: Belém – PA. **XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Fortaleza, 2019.

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, p. 1185, 2019.

SOUZA, G. G. B.; NISHIZIMA, M. L. Estudo da Caracterização Climática: Belém – PA. **XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Fortaleza, 2019.

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, p. 1185, 8 mar. 2019.

TATOVIĆ, M., MILOVANOVIC, A., KARAPANDZIC, I. Device for the remote measurement of meteorological data based on Arduino platform. **Serbian Journal of Electrical Engineering**, v. 13, n. 1, p. 133–144, 2016.

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. 2003. **Tese (Doutorado em Meteorologia)**, INPE, 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, p. 101717, ago. 2021.