

Performance de um sistema alternativo de monitoramento e coleta de dados meteorológicos

Performance of an alternative system for monitoring and collecting meteorological data

¹Allan Carlos de Andrade, ²Emerson Galvani, ³Paulo Henrique de Souza

¹Mestrando em Geografia Física no Programa de Pós-Graduação em Geografia Física – Universidade de São Paulo (allan.andrade@usp.br)

²Professor do departamento de Geografia – Universidade de São Paulo (egalvani@usp.br)

³Professor do Instituto de Ciências da Natureza – Universidade Federal de Alfenas (paulohenrique.souza@unifal-mg.edu.br)

RESUMO: A presente pesquisa apresenta uma proposta de inovação tecnológica que procura disseminar a estrutura de pesquisa pelos diversos municípios brasileiros através do uso de equipamentos alternativos e de baixo custo que sejam eficazes e confiáveis para a coleta e registro de dados meteorológicos. A proposta principal deste projeto é a construção de uma estação meteorológica alternativa, usando o microcontrolador Arduino UNO, com o auxílio de sensores eletrônicos que captam as variáveis atmosféricas, como a temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade do vento e precipitação. Por meio da comprovação da eficácia da estação meteorológica alternativa, mediante a comparação com dados coletados por estação convencional do INMET, a partir dos índices estatísticos MAE, RMSE e R², mostrou-se possível aumentar a rede de coleta de dados atmosféricos por meio desses equipamentos, além de auxiliar na elaboração de diagnósticos e a implementação de planos estratégicos que asseguram a qualidade de vida da população.

Palavras Chave: Estação Meteorológica; Arduino; Sensores Eletrônicos; Atributos Climáticos.

ABSTRACT: This research presents a proposal for technological innovation that seeks to disseminate the research structure to the various Brazilian municipalities by using alternative, low-cost equipment that is effective and reliable for collecting and recording meteorological data. The main proposal of this project is to build an alternative weather station, using the Arduino UNO microcontroller, with the aid of electronic sensors that capture atmospheric variables, such as air temperature and relative humidity, atmospheric pressure, wind speed and precipitation. By proving the effectiveness of the alternative weather station, through comparison with data collected by INMET's conventional station, using the MAE, RMSE, and R² statistical indices, it proved possible to increase the atmospheric data collection network using this equipment, as well as helping to draw up diagnoses, and implement strategic plans to ensure the population's quality of life.

Keywords: Weather Station; Arduino; Electronic Sensors; Climatic Attributes.

1. INTRODUÇÃO

A condição atmosférica é fator crucial no que diz respeito à qualidade de vida da sociedade e no desempenho satisfatório das atividades antrópicas, como a agricultura e pecuária, transporte e geração de energia, além de influir na biodiversidade e saúde pública (PERAZZI *et al.*, 2021).

Destacando-se pela abrangência, frequência e intensidade, o ritmo das mudanças climáticas faz com que suas manifestações se façam sentir por toda parte, repercutindo em diversas áreas da vida humana, afetando, inclusive, o próprio equilíbrio dos recursos disponibilizados pela biodiversidade. Em razão disto, esse assunto vem ocupando um espaço cada vez maior na lista de preocupações da sociedade contemporânea, tratando-se de um dos problemas mais relevantes da atualidade.

Considerando a enorme extensão territorial do Brasil, a rede pública de estações meteorológicas é insuficiente para cobrir todo o território. Além disso, o órgão responsável pelas estações, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), atravessa um momento de sucateamento, com estações meteorológicas abandonadas, demissão em massa de

funcionários e corte de recursos públicos, afetando a abrangência do monitoramento atmosférico em todo o território.

De acordo com Cristaldo *et al.* (2017), a densidade da rede de estações meteorológicas em território nacional não é satisfatória. Isto torna as estações alternativas de baixo custo uma opção para suprir esta demanda de dados e monitoramento atmosférico nas regiões que não são cobertas com estações meteorológicas.

Para auxiliar no monitoramento atmosférico nessas regiões, existem alternativas eficientes e baratas, capazes de proporcionar medições de variáveis meteorológicas confiáveis e disponibilizar dados diariamente. Uma das alternativas é o Arduino UNO.

O Arduino UNO participa desse momento de inovação tecnológica que vivenciamos, possibilitando uma maior variedade de estudos de caráter ambiental, devido à facilidade de manejo e baixo custo, atrelada também ao baixo custo dos dispositivos de entrada e saída utilizados para manipular dados para a pesquisa científica, pois

O Arduino é uma plataforma de *hardware open source* de fácil utilização, ideal para a criação de dispositivos que permitam interação com o ambiente, dispositivos estes que utilizem como entrada sensores de temperatura, luz, som etc., e como saída leds, motores, *displays*, alto-falantes etc., criando desta forma possibilidades ilimitadas (SOUZA, *et al.*, 2011, p. 1702).

Diante da possibilidade de produzir dados primários do comportamento momentâneo da atmosfera através de equipamentos alternativos de baixo custo, a escolha do Arduino é feita como base para a produção de estações meteorológicas alternativas que facilitem a operacionalidade da coleta e armazenamento de dados atmosféricos com ampla interface às redes, computadores e demais mecanismos de composição do ambiente digital. McRoberts (2011) reconhece tal recurso ao mencionar que

A maior vantagem do Arduino sobre outras plataformas de desenvolvimento de microcontroladores é a facilidade de sua utilização; pessoas que não são da área técnica podem, rapidamente, aprender o básico e criar seus próprios projetos em um intervalo de tempo relativamente curto (McROBERTS, 2011, p. 20).

Contudo, o desenvolvimento de estações alternativas recobra o emprego de sensores que meçam as variáveis meteorológicas, atuando como dispositivos de entrada que coletam e encaminham dados que serão processados pelo Arduino, compondo o arcabouço necessário para a substituição das estações convencionais que encarecem a coleta de dados.

Além da importância que possui para o desenvolvimento da pesquisa científica, a estação meteorológica também possui relevância para o desenvolvimento de diversas atividades econômicas, sobretudo na agricultura.

No entanto, diante dos custos atuais, os pequenos produtores que necessitam dos dados atmosféricos e seu monitoramento não possuem condições de adquiri-las, ficando reféns de previsões que não levam em consideração as características climáticas locais, visto que as variáveis meteorológicas afetam diretamente no desempenho de suas atividades. A esse respeito, Torres *et al.* (2015) mencionam que

Este alto preço desencoraja o uso dessas estações meteorológicas para diversos fins. Percebe-se também a dificuldade do uso desses equipamentos encontrada por profissionais como agricultores, pescadores ou maricultores, por exemplo, que não receberiam o custo-benefício desses equipamentos, embora os dados meteorológicos lhes sejam essenciais (TORRES *et al.*, 2015, p. 2)

Em face disto, a utilização da estação produzida através do Arduino e sensores que registram as variáveis meteorológicas, torna-se uma possibilidade tanto para a pesquisa acadêmica, quanto para os pequenos produtores que dependem do monitoramento da atmosfera, estimulando pesquisas ocupadas com sua aplicação, algo corroborado por Silva *et al.* (2018) ao mencionarem que

Fica claro através dos inúmeros estudos que vem sendo realizados, o potencial da ferramenta em contribuir para os mais diversos temas e interesses. Com a integração das diversas tecnologias as atividades da sociedade, a compreensão holística do meio em que vivemos será cada vez mais evidente, evidenciando também a necessidade urgente do homem em sustentabilizar sua relação com o mundo em vive (SILVA, *et al.*, 2018, p. 4)

Enfatizando que

Atualmente existem equipamentos de alta precisão para coleta de dados climatológicos presentes em modernas estações meteorológicas e automáticas, mas o alto custo desencoraja o uso por parte do poder público, privado e acadêmico. Prejudicando imensamente o desenvolvimento de políticas, pesquisas e planos estratégicos devido à falta destas informações indispensáveis (SILVA, *et al.*, 2018, p. 2).

Cureal *et al.* (2022) desenvolveram um equipamento que utiliza sensores de baixo custo com o objetivo de monitorar a temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento, radiação solar global, concentração de CO₂ e O₃ na atmosfera, além dos materiais particulados PM_{1.0}, PM_{2.5} e PM₁₀, auxiliando no monitoramento da qualidade do ar no clima urbano.

Krüger *et al.* (2024) também desenvolveram um sistema, do tipo mochila, usando equipamentos de baixo custo para monitorar a qualidade do ar, iluminação e níveis de ruído, a partir de variáveis medidas por sensores de baixo custo acoplado a um microcontrolador. O equipamento foi capaz de captar com sucesso mesmo as mais pequenas diferenças nas condições ambientais, comprovando a eficácia desses sensores e microcontroladores.

Nametalá *et al.* (2021) utilizou a plataforma Arduino e um sensor DHT11 para monitorar a temperatura e posteriormente calcular o índice de evapotranspiração de referência e apresentá-los ao usuário por meio de sistema web.

Atentando para isto e para a demanda existente de monitoramento das variáveis atmosféricas, a presente pesquisa foi elaborada objetivando a minimização dos custos da coleta de dados atmosféricos mediante a montagem de uma estação meteorológica alternativa que permita a difusão desse tipo de equipamento e sua instalação nos vazios que ainda existem pelo território nacional, auxiliando no aparelhamento do Estado e aumentando a rede de coleta, pois em países como o Brasil, a maioria dos municípios não conta com uma estrutura básica de coleta de dados que possibilite o acúmulo de informações que municiem estudos ocupados com essa temática.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Aquisição dos equipamentos utilizados na montagem da Estação Alternativa

Para a montagem da estação, primeiramente, foi adquirida a plataforma Arduino, que é o ‘cérebro’ da estação alternativa. Para as medições das variáveis atmosféricas e aquisição dos dados meteorológicos, foram utilizados os sensores DHT22, para as medições de temperatura e umidade relativa do ar e o BMP280, responsável por medir a pressão atmosférica. Para as

medições velocidade do vento foi usado o sensor ANBR1, da marca Ciclus e para medir o volume de precipitação foi usado o pluviômetro PLAB1, da mesma marca. Após a aquisição de todos os sensores, foi necessária a utilização de um módulo micro SD, com a função de armazenar os dados coletados por eles em um cartão micro SD (cartão de memória), além de um módulo RTC (Real Time Clock) DS3231 para gravar data e hora das medições no cartão de memória e um abrigo meteorológico para a fixação do sensor DHT22.

2.2. Plataforma Arduino

Em termos leigos, “o Arduino é um computador minúsculo que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos que conectar a ela” (McROBERTS, 2013, p. 27). Existem quatro tipos de Arduino, o Arduino NANO, Arduino UNO, Arduino LEONARDO e Arduino MEGA, em que as suas principais diferenças estão entre a capacidade de armazenamento, o número de entradas digitais e analógicas e de alimentação. Para este projeto, foi utilizado o Arduino UNO (Figura 1), que possui um total de 14 entradas/saídas digitais, 6 entradas analógicas, além de dois pinos de alimentação de 5V (volts), um pino de 3,3V, um VIN (pino usado para alimentação externa do Arduino) e dois GND (pino negativo), e possui uma memória flash de 32kb.

Figura 1 – Plataforma Arduino UNO R3.



2.3. Sensor de Temperatura e Umidade Relativa do ar – DHT22

O sensor DHT22 tem a capacidade de medir temperaturas entre -40°C e $+80^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de 0 a 100%, com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 2\%$, respectivamente. Este sensor possui três pinos, um positivo (+) é conectado à entrada de 5V do Arduino, um pino negativo (-) que é conectado ao GND do Arduino, além de um pino com saída digital (out), este conectado à entrada digital 3 do Arduino. O DHT22 foi instalado em um abrigo meteorológico de alumínio, acoplado ao pluviômetro.

2.4. Sensor de Pressão Atmosférica – BMP280

O BMP280 é um sensor de pressão atmosférica que possui $\pm 0,12\text{hPa}$ de precisão na faixa entre 300 e 1100hPa. Também é utilizado para medir a temperatura, mas com menor variabilidade se comparado ao DHT22. Além da capacidade de medição da pressão atmosférica e temperatura, o BMP280 também pode calcular a altitude aproximada do local em que ele estiver instalado, apresentando multiuso.

2.5. Anemômetro e Pluviômetro

Para as medições da velocidade do vento e precipitação foram usados os sensores ANBR1 e PLAB1, respectivamente. O ANBR1 mede a velocidade do vento num intervalo de 0 a 36,6m/s, com precisão de 0,5m/s, já o PLAB1 mede o total de chuva com uma precisão de 0,25mm e erros de 4% até 30mm/h, 5% até 50mm/h e 7% até 90mm/h.

O anemômetro possui 3 pás em formatos de copo, capazes de medir a velocidade do vento, com precisão de 0,14m/s. A ligação feita ao Arduino é muito simples, pois possui apenas dois cabos, sendo um deles destinado à alimentação do sensor (5V) e o segundo cabo conectado ao pino digital 2 do Arduino, para a comunicação. Para o correto funcionamento do dispositivo é necessário um resistor de 10 K Ω (kiloohm) entre a entrada digital 2 e o GND do Arduino.

O pluviômetro de báscula, utilizado para fazer as medições de precipitação, tem um funcionamento digital, através de uma “gangorra” em seu interior. Esta gangorra desce com o peso da água, gerando um pulso elétrico, com precisão de 0,25 mm de chuva, ou seja, para contabilizar 1 mm de chuva são necessários 4 pulsos elétricos.

Também de ligao simples, o pluviômetro possui apenas dois cabos, sendo um destinado  alimentao do dispositivo, conectado ao pino 5V do Arduino e o outro cabo  entrada digital 6, também sendo necessário um resistor de 10 K Ω entre a entrada digital e o GND do Arduino.

2.6. Módulo micro SD

O módulo micro SD  responsável pelo armazenamento dos dados meteorológicos coletados pela estao. O Módulo se comunica através da interface SPI com sinal de nível 3,3V, mas internamente possui um regulador permitindo a ligao de placas e controladores que trabalham com 5V, que  o caso do Arduino.

2.7. Módulo RTC DS3231

O módulo RTC DS3231 (Real Time Clock) foi utilizado para gravar data e hora das medies da estao. O RTC  um relógio de tempo real de alta precisão e baixo consumo de energia, sendo capaz de fornecer informaes como segundo, minutos, dia, data, mês e ano. Para fazer a ligao do módulo são utilizados 4 pinos, o SCL (conectado  porta analógica A4), o DAS (conectado  porta analógica A5), o VCC (conectado ao 5V) e o GND (conectado ao GND).

A seguir, a Tabela 1 apresenta as especificaes e o preço, em dólares, dos equipamentos usados na montagem da estao.

Tabela 1 – Especificação e valor dos componentes usados na montagem do equipamento.

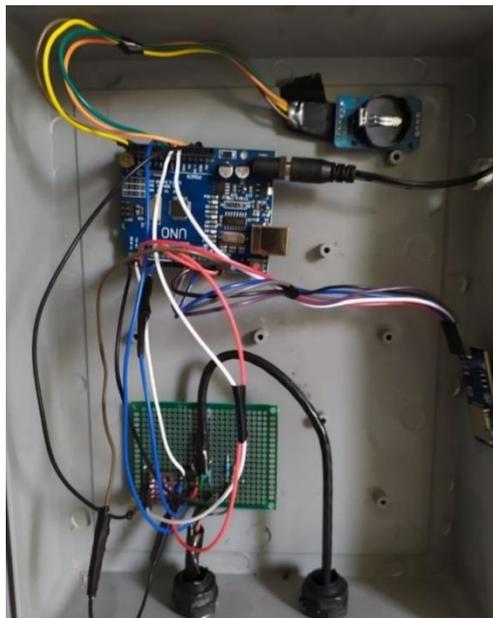
Componente	Especificações	Valor
Arduino UNO R2	- Microcontrolador; - Central de dados.	US\$ 10,76
ANBR1	- Velocidade: 0 ~ 36,6 m/s, com precisão de 0,5 m/s;	US\$ 89,53
PLAB1	- Precisão: 0,25mm; - Erro: 4% até 30mm/h; 5% até 50mm/h; 7% até 90mm/h; - Com abrigo meteorológico.	US\$ 90,10
DHT22	- Temperatura: -40 ~ 80°C, com precisão de 0,5°C; - Umidade: 0 ~ 100%, com precisão de 5%.	US\$ 5,20
BMP280	- Pressão atmosférica: 300 ~ 1.100 hPa, com precisão de 0,12 hPa.	US\$ 1,55
Outros	- RTC – DS3231: armazenar data e hora; - Micro SD: armazenamento dos dados; - Caixa hermética, cabos e fios.	US\$ 15,40
Total		US\$ 212,54

2.8. Montagem e teste da estação alternativa

Após a aquisição de todos os componentes necessários, deu-se início a montagem da estação meteorológica alternativa. Todos os componentes foram testados individualmente antes da soldagem do circuito completo, com todos os sensores e módulos.

Verificado o funcionamento de todos os componentes, foi feita a soldagem dos fios na placa de circuito impresso e conectados ao Arduino, demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Circuito elétrico da estação alternativa.



Para a verificação do funcionamento simultâneo de todos os componentes da estação, ou seja, todos conectados ao Arduino ao mesmo tempo, foi necessária a compilação de todos os códigos dos componentes em um só, desenvolvidos na linguagem C de programação. Os códigos dos sensores de chuva (pluviômetro) e de velocidade do vento (anemômetro) foram fornecidos pela empresa no momento da compra, já os códigos dos outros sensores e módulos estão disponíveis no próprio software do Arduino (IDE Arduino), sendo necessárias apenas algumas adaptações às necessidades do projeto.

Para coletar os dados, a estação foi instalada na mesma localidade da estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na Universidade Federal de Lavras (UFLA), no período de 28 de setembro a 14 de outubro de 2021, para posterior análise e comparação dos dados obtidos pela estação alternativa e a estação convencional. A Figura 3 ilustra a estação montada no local de coleta dos dados.

Figura 3 – Estação alternativa instalada no local de coleta dos dados (UFLA).



2.9. Medidas estatísticas para acurácia dos dados

As medidas estatísticas adotadas para calcular a acurácia dos dados foram as seguintes:

Erro Absoluto Médio (MAE) – De acordo com Montgomery *et al.* (2008), o MAE calcula a variabilidade no erro de um conjunto de dados em relação a outro. Quanto mais próximo de zero for o valor de MAE, melhor é a representação do conjunto de dados (HALLAK *et al.*, 2011). Ou seja, quanto mais próximo de zero, maior a semelhança entre os dados comparados.

Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) – Mede a variabilidade no erro de duas séries temporais, somando os quadrados dos erros obtidos (MAE) e obtendo a média entre eles, a raiz quadrada da média resulta no RMSE (MONTGOMERY *et al.*, 2008). Esta metodologia é utilizada para calcular a acurácia dos resultados, utilizando valores de erro na mesma dimensão da variável analisada (HALLAK *et al.*, 2011).

Coefficiente de Determinação (R^2) – O R^2 avalia o ajuste e a variação dos dados a serem comparados (MONTGOMERY *et al.* 2008). O coeficiente de determinação varia entre 0 e 1, quanto mais próximo de 1, menor é a variação entre os dados analisados, de acordo com Morettin *et al.* (2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A estação meteorológica alternativa coletou dados durante 17 dias. A comparação dos dados foi feita com base nos horários em que são coletados e divulgados os dados diários pela estação convencional do INMET, registrados em três horários, 00-UTC, 12-UTC e 18-UTC, correspondente às 21h, 9h e 15h no horário local. A Tabela 2 apresenta os equipamentos usados nas duas estações (EMA – Estação Meteorológica Alternativa; EMC – Estação Meteorológica Convencional).

Tabela 2 – Equipamentos e variáveis analisadas na estação meteorológica alternativa (EMA) e estação meteorológica convencional (EMC).

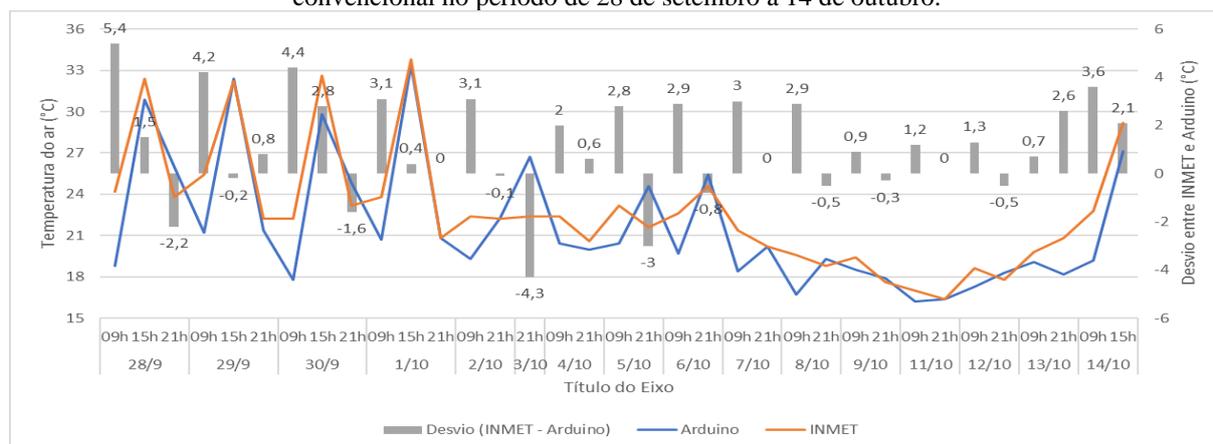
Estação	Variável	Sensor	Precisão	Medida
EMA	Temperatura	DHT22	0,5°C	°C
	Umidade	DHT22	5%	%
	Pressão atm.	BMP280	0,12hPa	hPa
	Vel. vento	Anemômetro	0,5m/s	m/s
	Precipitação	Pluviômetro	0,25mm	mm
EMC	Temperatura	Mercúrio	0,2°C	°C
	Umidade	Psicrômetro	5%	%
	Pressão atm.	Mercúrio	0,2hPa	hPa
	Vel. vento	Anemógrafo	0,1m/s	m/s
	Precipitação	Báscula	0,1mm	mm

Fonte: PEREIRA *et al*, 2008; SOUZA *et al*, 2003.

3.1. Comparação entre os dados de temperatura do ar – DHT22

Como é possível observar na Figura 4, os dados de temperatura registrados pelas duas estações possuem semelhanças. Em vários momentos as temperaturas registradas foram exatamente iguais, como no dia 01 de outubro às 21h, quando ambas registraram 20,8 °C. No campo das discrepâncias, destaca-se o registro do dia 28 de setembro às 9h, onde a estação do INMET registrou 24,2 °C, enquanto a estação alternativa havia registrado 18,8 °C, uma diferença de 5,4 °C.

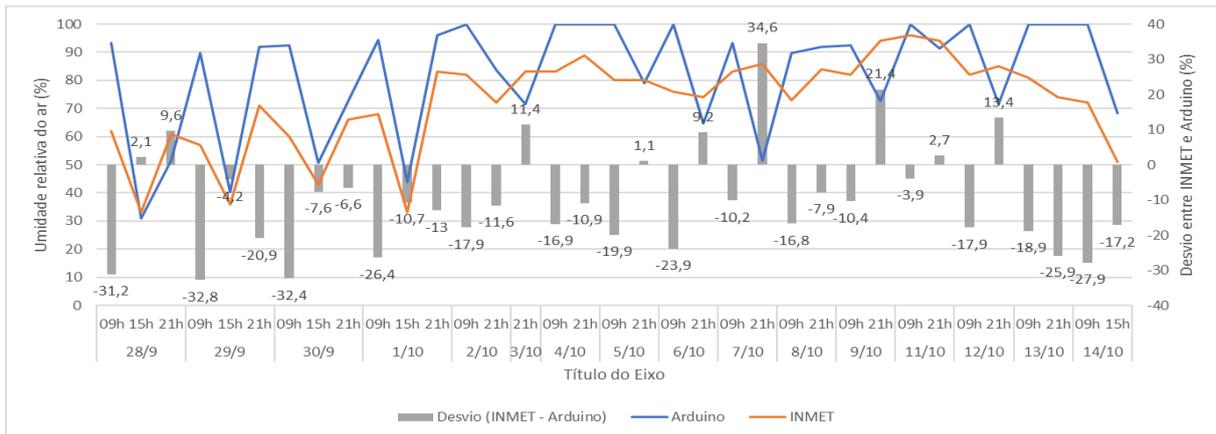
Figura 4 – Comparação entre os dados de temperatura do ar (°C) registrados pelas estações alternativa e convencional no período de 28 de setembro a 14 de outubro.



3.2. Comparação entre os dados de umidade relativa do ar – DHT22

De acordo com a Figura 5, os dados de umidade relativa do ar registrados pelas duas estações demonstram maior variabilidade entre si. Como é possível observar, em vários momentos houve diferença considerável, como no dia 14 de outubro às 9h, a estação do INMET registrou 72% de umidade, enquanto a EMA indicou 99,9%. Por outro lado, em vários momentos houve pequena diferença, como no dia 05 de outubro às 21h, a estação do INMET registrou 80% de umidade, enquanto a EMA apontou 79,9%.

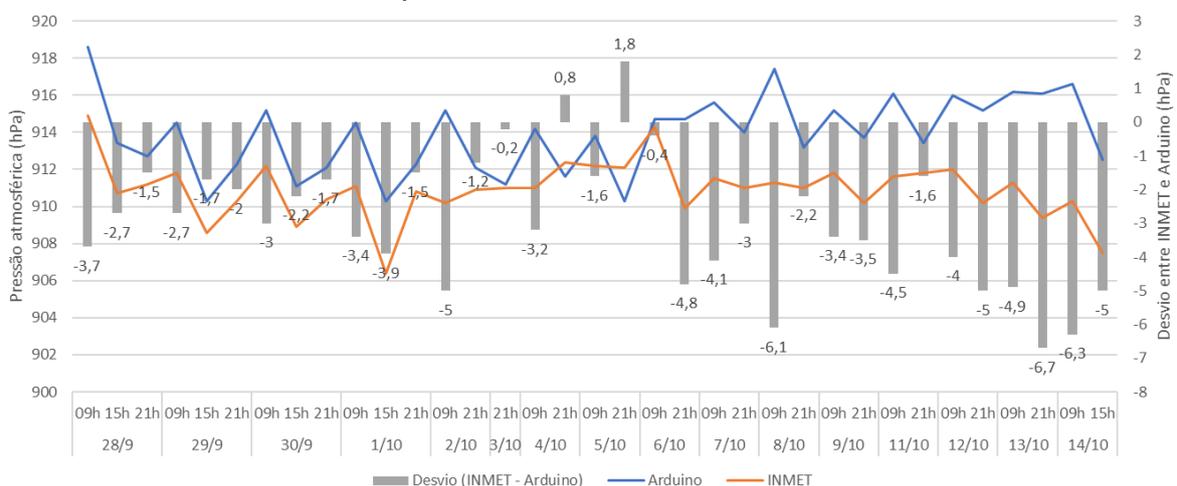
Figura 5 – Comparação entre dados de umidade relativa do ar (%) registrados pelas estações alternativa e convencional no período de 28 de setembro a 14 de outubro de 2021.



3.3. Comparação entre os dados de pressão atmosférica – BMP280

Apresenta-se na Figura 6 os dados registrados pelo sensor BM280 e os dados de pressão atmosférica ao nível da estação registrados na estação do INMET.

Figura 6 – Comparação entre dados pressão atmosférica (hPa) registrados pelas estações alternativa e convencional no período de 28 de setembro a 14 de outubro de 2021.



É possível observar que os valores de pressão atmosférica obtidos pelo sensor foram sempre superiores aos coletados pela estação convencional, com exceção dos dias 4 e 5 de outubro. Sendo assim, houve pouca semelhança entre eles, explicada pela diferença de funcionamento dos sensores, já que a estação alternativa usa um sensor eletrônico e o da convencional que opera de maneira mecânica.

3.6. Acurácia dos dados coletados

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios das variáveis obtidas pela EMA e EMC, além dos valores estatísticos de MAE, RMSE e R².

Tabela 3 – Valores de MAE, RMSE e R².

VARIABLES	MÉDIA				
	EMC	MÉDIA EMA	MAE	RMSE	R ²
Temperatura do ar (°C)	22,8	21,7	-1,09	2,3	0,79
Umidade do ar (%)	72,2	81,9	9,6	18,2	0,43
Pressão atmosférica (hPa)	910,9	913,9	2,9	3,5	0,22
Velocidade do vento (m/s)	1,7	1,3	-0,4	2,5	0,14
Precipitação total (mm)	59	64	0,14	0,9	0,97

O valor de MAE para a temperatura foi de -1,09°C, acima do erro instrumental dos sensores, que é de 0,5°C para a EMA e 0,2°C para a EMC, portanto, os dados de temperatura medidos pelo sensor DHT22 ficaram subestimados em relação aos dados da estação convencional. Comportamento semelhante foi verificado no indicador RMSE, estimado em 2,3°C. O R² calculou 0,79, ou seja, 79% dos dados de temperatura calculados pela estação alternativa são explicados pela estação convencional, demonstrando boa semelhança entre ambos.

Para a umidade relativa do ar, o valor de MAE foi de 9,6%, ou seja, os dados estimados pelo sensor DHT22 para a umidade ficaram superestimados em relação à estação convencional, superior ao erro dos instrumentos, que é de 5% em ambos. Já o RMSE apontou uma variação de 18,2% entre as estações. O valor de R² foi de 0,43, sendo este um resultado mediano, demonstrando que há certa semelhança entre os dados de umidade relativa do ar calculado pelas estações. Em outros trabalhos que comparam dados de umidade relativa do ar entre estações convencionais e automáticas, esta variável se mostrou um elemento que possui considerável variação. Pereira *et al.* (2008) encontraram valores de MAE de 13,8%, acima do erro encontrado entre a estação alternativa e a convencional. O motivo dessa discrepância se dá pelo tipo de sensor que foi utilizado pela estação alternativa, que é um sensor eletrônico, enquanto as medições feitas pela estação convencional são mecânicas, ou seja, os dados são coletados de maneira diferente, podendo haver variações em seus valores.

A pressão atmosférica estimada pelo sensor BMP280 demonstrou grande variação em relação aos dados coletados pela EMC. O MAE calculado foi de 2,9 hPa, indicando que estação alternativa superestimou a estação convencional, substancialmente maior que o erro operacional de ambas, que é de 0,12hPa (EMA) e 0,2hPa (EMC). O RMSE foi de 3,5 hPa, mostrando que os valores de pressão atmosférica estimados entre as estações possuem uma variação média de 3,5hPa. Já o coeficiente de determinação (R²) calculado foi de 0,22, mostrando que há pouca semelhança entre os dados, sendo também motivado pela diferença entre o sensor eletrônico utilizado pela EMA e o método mecânico de medição de pressão atmosférica utilizado pela EMC. Como foi possível ver na Figura 6, para esta variável, o comportamento de ambos os sensores foi o mesmo, comprovando que a calibragem pode ser a razão da diferença de índices registrados para a medição da pressão atmosférica.

Para a velocidade do vento, o valor de MAE foi de -0,4 m/s, ou seja, as medições feitas pela estação alternativa subestimaram a estação convencional, dentro do erro instrumental da EMA (0,5m/s), porém acima do erro da EMC (0,1m/s). O RMSE aponta uma variação de 2,5m/s nos dados registrados pelas estações. O R² apontou baixa semelhança entre os dados de velocidade do vento, calculando 0,14. Esta discrepância pode ter ocorrido devido à diferença de altura entre o anemômetro da estação alternativa e da estação convencional, que possui o sensor de vento a uma altura superior ao da estação alternativa.

Os dados de precipitação foram os que obtiveram resultados mais semelhantes. O MAE calculado foi de 0,14mm, dentro do erro instrumental da EMA (0,25mm) e pouco acima do erro da EMC (0,1mm), com o pluviômetro da estação alternativa superestimando a estação convencional. O RMSE apontou também uma baixa variação entre os dados, de apenas 0,9mm. Enquanto o R^2 mostrou que os dados de precipitação calculados pelas estações são muito semelhantes, calculado em 0,97.

A partir da comparação entre as duas estações meteorológicas, percebe-se que os dados produzidos pela EMA possuem um desvio considerável em relação aos dados da EMC. Este desvio é explicado pelo modo de operação diferente entre as duas estações. Os sensores usados na estação alternativa funcionam a partir de pulsos elétricos, de modo automático, enquanto a estação convencional opera de maneira mecânica.

Sendo assim, é possível obter resultados mais precisos se a estação meteorológica de referência for automática, já que os sensores funcionariam de maneira semelhante aos da estação alternativa, eliminando assim a possibilidade de haver diferenças entre os dados causados pelo funcionamento diferente entre os sensores.

Strigaro *et al.* (2019) construíram uma estação meteorológica também a partir do Arduino, usando sensores eletrônicos para medir dados de temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica e precipitação. A comparação entre os dados produzidos por ela foi feita usando uma estação meteorológica automática da marca *Campbell Scientific*. Pelo fato delas usarem sensores eletrônicos e automáticos, os autores evidenciaram um R^2 de 0,99, para a temperatura do ar (sensor DHT11), umidade relativa do ar e pressão atmosférica (sensor BME280) e precipitação.

Também usando uma estação meteorológica automática para comparar os dados coletados pela estação usando o Arduino, Silva *et al.* (2015) obtiveram bons resultados usando sensores de baixo custo. O sensor DHT11 mediu temperaturas do ar com 0,96°C de diferença em relação à estação automática, enquanto o desvio médio para a umidade relativa do ar foi de 0,63% e 26,6hPa para a pressão atmosférica.

Portanto, conforme apontam outros estudos, os sensores de baixo custo e o Arduino têm capacidade de produzir um banco de dados meteorológicos de qualidade, quando comparados a dados produzidos a partir de sensores que operam de maneira semelhante, comprovando a eficácia dessas estações.

4. CONCLUSÃO

A estação alternativa construída através do Arduino UNO e dos sensores de baixo custo pode ser útil para estudos climáticos e suprir uma demanda existente de monitoramento atmosférico em regiões que não possuem estações meteorológicas instaladas. Atualmente, o valor de mercado de uma estação meteorológica automática oficial pode variar de US\$ 1.500,00 a US\$ 2.500,00. Para construir a estação alternativa foram gastos um total de US\$ 212,54.

Um fator que deve ser levado em consideração é a vida útil dos equipamentos utilizados na montagem da EMA. Não se sabe quanto tempo de vida útil cada sensor possui exposto às intempéries do clima, sendo este um estudo necessário para otimizar e delimitar sua precisão. Visando um melhor resultado, também é possível incrementar outros componentes à estação, como por exemplo, um módulo *wireless* para enviar os dados medidos a um dispositivo eletrônico em tempo real, sem a necessidade de coletar os dados através do cartão SD.

Outros incrementos importantes são placa fotovoltaica e bateria, para que a estação tenha sua própria fonte de energia e não necessite de uma fonte de alimentação externa, que pode ser um empecilho para o uso da estação em locais mais remotos. A possibilidade de

utilização de outro Arduino que possua maior quantidade de armazenamento também é uma proposta que pode melhorar a qualidade da estação, como se observa com o Arduino Mega, o que possibilita a conexão de mais dispositivos eletrônicos de entrada e saída, aumentando assim a variedade de elementos climáticos monitorados.

Diante do exposto, o presente estudo encerra-se com a certeza de que a busca pela estratégia de complementação da rede nacional de dados meteorológicos é promissora, sobretudo pela relação custo-benefício que se observa na estação meteorológica alternativa construída, possibilitando monitoramento atmosférico nas regiões carentes, onde não há estação meteorológica instalada, constituindo em alternativa a pequenos produtores rurais que são dependentes das condições atmosféricas para a obtenção de resultados satisfatórios em suas produções e auxiliar no desenvolvimento de pesquisas acadêmicas que necessitam deste equipamento.

5. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à CAPES pelo financiamento da pesquisa. O segundo autor agradece ao CNPQ pelo incentivo financeiro por meio da bolsa de pesquisa e produtividade (nível 1D) e o terceiro autor agradece à UNIFAL-MG e à USP pela parceria.

6. REFERÊNCIAS

CRISTALDO, M. F. *et al.* Analysis and distribution of the rainfall monitoring network in a Brazilian Pantanal region. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 199-205, 2017.

CUREAU, R.J. *et al.* A New Wearable System for Sensing Outdoor Environmental Conditions for Monitoring Hyper-Microclimate. **Sensors**, v. 22, n. 50, [s.I.], 2022.

HALLAK, R. *et al.* Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011.

KRÜGER, E., IHLENFELD, W., CALLEJAS, I. J. A. *et al.* Introducing PLEMS: the application of a low-cost, portable monitoring system in environmental walks. **International Journal of Biometeorology**, v. 68, p. 2357–2371, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02754-x>.

McROBERTS, M. **Arduino Básico**. São Paulo: Novatec, 1ª edição, 2011.

MONTGOMERY, D. C. *et al.* **Introduction to Time Series Analysis and Forecasting**. 2ª edição. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

MORETTIN, P. A. *et al.* **Estatística Básica**. 6ª edição. São Paulo: Editora Saraiva, 2010.

NAMETALA, M. S. *et al.* Estação meteorológica de baixo custo para cálculo, armazenamento e exibição da evapotranspiração de referência. **Revista Mundi**, v.6, n.2, p.342-01–342-26, 2021.

PERAZZI, P. *et al.* O Tradicional ou o Moderno? Uma Visão da Informação da Rede de Estações Meteorológicas Brasileiras. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 351-366, 2021.

PEREIRA, L. M. P. *et al.* Comparative analysis of meteorological data obtained by conventional and automatic stations in Londrina – PR. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 2, p. 299-306, 2008.

SILVA, M. S. D. *et al.* Desenvolvimento de um Termohigrômetro de baixo custo para estudos climáticos e ambientais. In: XIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, nov, 2018, Juiz de Fora – MG. **Anais....** Juiz de Fora, 2018.

SILVA R. B. *et al.* Estações meteorológicas de código aberto: Um projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n.1, 2015.

SOUZA, R. A.; PAIXÃO, A. C.; UZÊDA, D. D.; DIAS, M. A.; DUARTE, S.; AMORIM, H. A placa Arduíno: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.33, n. 1, 2011.

SOUZA, I. A. *et al.* Comparative study between meteorological elements monitored by conventional and automatic stations in the region of Maringá, State of Paraná. - doi: 10.4025. **Acta Scientiarum Technology**, v.25, n. 2, p. 203-207, 2008.

STRIGARO, D. *et al.* Boosting a Weather Monitoring System in Low Income Economies Using Open and Non-Conventional Systems: Data Quality Analysis. **Sensors**, v. 19, n. 1185, 2019.

TORRES, J. D. *et al.* Aquisição de dados meteorológicos através da Plataforma Arduino: construção de baixo custo e análise de dados. **Scientia Plena**, v. 11, n. 2, 2015.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.