

# Desenvolvimento de uma estação meteorológica a partir de materiais reutilizados e sensores de baixo custo

Development of a meteorological station using reused materials and low-cost sensors

Wenderson R.F. Silva<sup>\*1</sup>, Karoline G. Mendes<sup>2</sup>, Ricardo dos Santos Ferreira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Física, 36570-900, Viçosa, MG, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 36570-900, Viçosa, MG, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Informática, 36570-900, Viçosa, MG, Brasil.

Recebido em 06 de novembro de 2023. Revisado em 19 de dezembro de 2023. Aceito em 06 de março de 2024.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma estação meteorológica automática e de baixo custo utilizando materiais reaproveitados e sensores de baixo custo, conectada ao site de visualização e gerenciamento de dados Ubidots. A estação conta com sensores de temperatura (AHT10), umidade (AHT10), pressão (BMP180), radiação solar (LDR), um pluviômetro e um anemômetro digital, ambos feitos com materiais reaproveitados e de fácil acesso, tendo sido o anemômetro desenvolvido com uma ventoinha (sensor hall) e o pluviômetro baseado num sensor magnético reed switch. Todo o sistema é conectado à placa de prototipagem eletrônica ESP8266, a qual já possui um módulo que permite a conexão com a internet. Todo o dispositivo foi custeado com cerca de 50 reais. Os sensores de temperatura, umidade e o anemômetro foram calibrados utilizando sensores padrão para garantir uma medição precisa. Os valores de umidade e temperatura foram então comparados aos dados obtidos por uma estação profissional próxima. O pluviômetro também passou por uma calibração para medir a quantidade de chuva em milímetros. Além disso, foram implementadas previsões baseadas em modelos para estimar o ponto de orvalho, pressão de vapor d'água, água precipitável e sensação térmica, fornecendo informações adicionais sobre as condições do tempo local.

**Palavras-chaves:** Instrumentação meteorológica, física da atmosfera, internet das coisas, ensino de física, ciência cidadã.

In this work, a low-cost automatic weather station was developed using reused materials and low-cost sensors, connected to the Ubidots data visualization and management website. The station has sensors for temperature (AHT10), humidity (AHT10), pressure (BMP180), solar radiation (LDR), a rain gauge and a digital anemometer, both made with reused and easily accessible materials, the anemometer being developed with a fan (hall sensor) and the rain gauge based on a reed switch magnetic sensor. The entire system is connected to the ESP8266 electronic prototyping board, which already has a module that allows connection to the internet. The entire device cost around 50 R\$. The temperature and humidity sensors and anemometer were calibrated using standard sensors to ensure accurate measurement. Humidity and temperature values were then compared to data obtained from a nearby standard weather station. The rain gauge also underwent calibration to measure the amount of rain in millimeters. Additionally, model-based forecasts were implemented to estimate dew point, water vapor pressure, precipitable water, and wind chill, providing additional information about local weather conditions.

**Keywords:** Meteorological instrumentation, atmospheric physics, internet of things, physics teaching, citizen science.

## 1. Introdução

O estudo do clima é uma prática ancestral que moldou culturas, crenças, hábitos e comportamentos ao longo da história, sendo de fundamental importância para a compreensão do ambiente, proporcionando maiores condições de sobrevivência [1]. Atualmente, as estações meteorológicas desempenham um papel essencial nesse estudo, coletando dados precisos e em tempo real sobre as condições atmosféricas. Sua importância

abrange a previsão do tempo, a compreensão dos padrões climáticos locais, o monitoramento de eventos climáticos intensos, o desenvolvimento da agricultura inteligente, a caracterização de ecossistemas, dentre outras atividades [2, 3]. A construção de estações meteorológicas com sensores de baixo custo e materiais acessíveis desempenha um papel crucial em várias áreas, ampliando o acesso a esses sistemas e permitindo que pesquisadores, produtores rurais, professores e vários outros agentes interessados em saber sobre as condições climáticas locais possam coletar dados e utilizá-los, de forma a otimizar recursos humanos e financeiros. O baixo custo de produção de tais estações torna viável

\*Endereço de correspondência: [wenderson.f@ufv.br](mailto:wenderson.f@ufv.br)

a implantação de mais estações em áreas com recursos limitados, preenchendo lacunas nas redes de observação meteorológica e ampliando a cobertura geográfica [4, 5]. Essas estações também podem ser utilizadas como ferramentas educacionais valiosas, envolvendo estudantes e comunidades locais para aumentar a conscientização sobre as condições meteorológicas e a importância da coleta de dados, promovendo o estímulo à ciência cidadã e à pesquisa participativa [6].

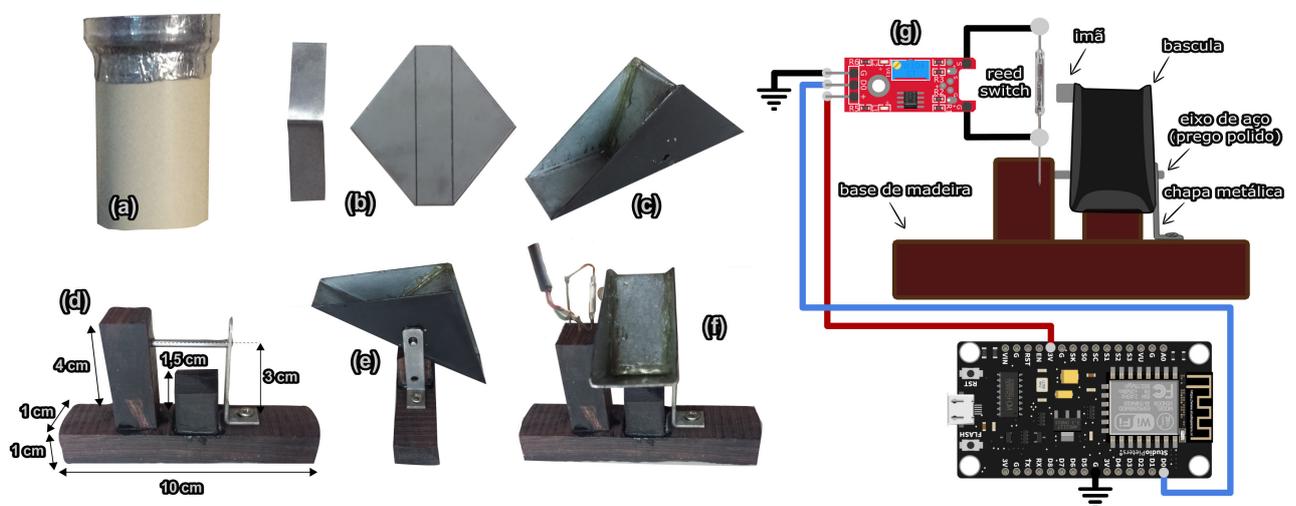
As estações meteorológicas profissionais são regidas por normas técnicas estabelecidas por instituições oficiais de meteorologia, seguindo uma padronização quanto aos materiais e instrumentos utilizados, dimensões e orientação norte-sul [7]. Tais estações são, ainda, certificadas pelo Inmet, as quais passam por calibrações periódicas [8]. No mercado existem diversos sistemas de estações climáticas desenvolvidos por empresas, porém, eles apresentam algumas limitações significativas. Entre elas estão o alto custo e a baixa flexibilidade, pois esses sistemas são restritos a sensores específicos e geralmente só se conectam a dispositivos de marca própria. Diante da ampla variedade de aplicações das medições obtidas pelas estações meteorológicas e do rápido crescimento da Internet das Coisas (IoT), tanto soluções comerciais quanto protótipos de código aberto com sensores de baixo custo, muitas vezes construídos pelos próprios usuários, têm sido impulsionados [3, 6]. Esses dispositivos são interconectados em redes sem fio, permitindo a obtenção de informações em tempo real e de forma remota. Além disso, têm surgido plataformas de processamento e visualização que facilitam a compreensão dos dados nas aplicações específicas como, por exemplo, a plataforma (IoT) chamada Ubidots [https://stem.ubidots.com], baseada em nuvem que permite monitorar, gerenciar e controlar dados de dispositivos conectados em tempo real, de forma gratuita e de fácil acesso.

Outros autores propuseram a montagem de estações meteorológicas de baixo custo, utilizando uma ampla variedade de plataformas de prototipagem eletrônica comumente encontradas no mercado, como o módulo Arduino [1, 9–13], o módulo NodeMCU [14], o módulo ESP32 [15] e um projeto utilizando Raspberry Pi em uma estação destinada à agricultura inteligente [2] para conectar as estações meteorológicas a plataformas online. Diferentemente das propostas de estações meteorológicas discutidas acima, o nosso projeto vai além ao abordar a construção do anemômetro e do pluviômetro digital. Essa abordagem não apenas enriquece o projeto, abordando de maneira mais completa a instrumentação científica associada, mas também promove a acessibilidade e sustentabilidade ambiental. Utilizando materiais reaproveitados e sensores de baixo custo, nossa estação meteorológica se torna acessível a um maior número de pessoas, permitindo que elas tenham acesso a informações precisas sobre o tempo. Além disso, a reutilização de materiais descartados contribui para a redução do impacto ambiental, alinhando o projeto com princípios de sustentabilidade e conscientização ambiental.

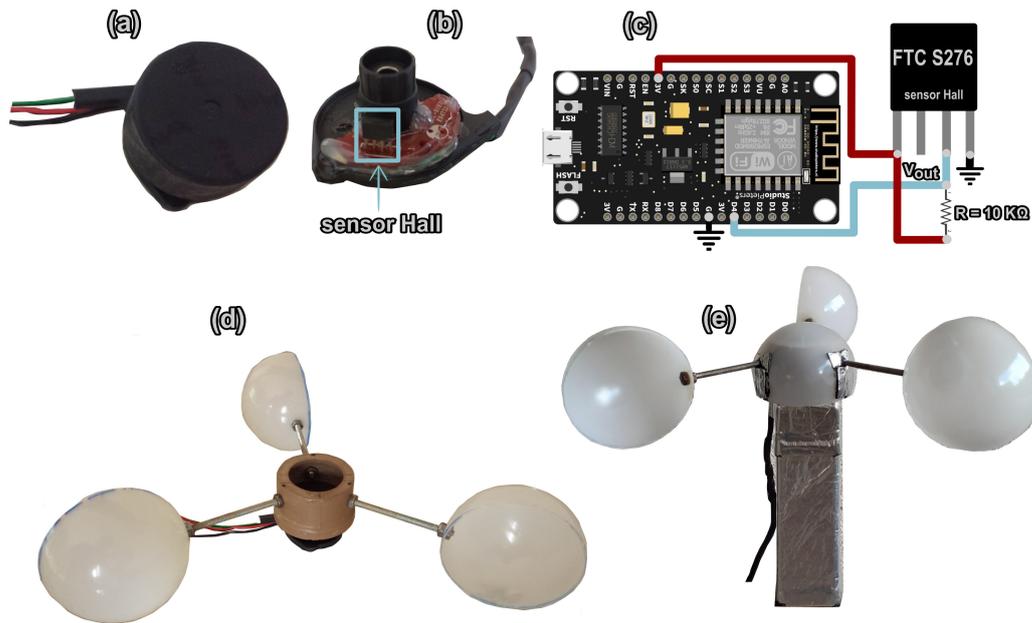
## 2. Material e Métodos

### 2.1. Construção do pluviômetro e anemômetro

Para a construção do “corpo” do pluviômetro, foram utilizados um funil de plástico com 11 cm de diâmetro e um tubo de pvc com 10 cm de diâmetro e 25 cm de altura. O funil, responsável pela captação da água, é fixado em uma das aberturas do tubo de pvc utilizando fita adesiva de alumínio a base de manta asfáltica, de modo que o furo central do funil coincida com o centro do tubo de pvc. A imagem da Figura 1a mostra o resultado final. Para a construção do sistema basculante,



**Figura 1:** (a) Imagem do corpo do pluviômetro, com o funil já fixado ao tubo de pvc, (b) placas após o corte, (c) balsa, (d) base com a balsa do pluviômetro, com eixo e suporte em L já fixados, (e) vista lateral do sistema basculante já fixada no suporte. Em (f), sistema basculante montado com sensores reed switches já fixados, conforme esquema mostrado em (g).



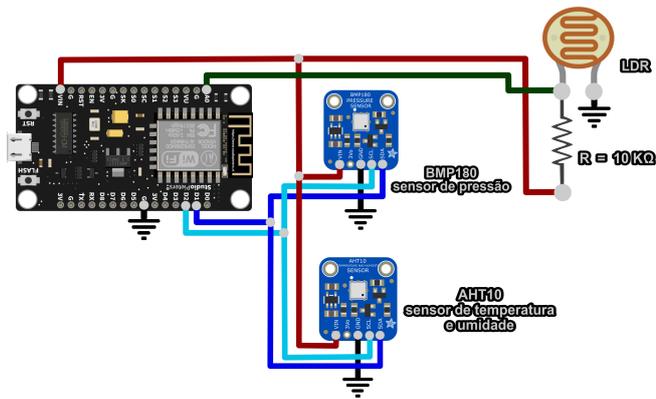
**Figura 2:** (a) Rotor da ventoinha sem as pás e sua estrutura externa, (b) parte interna, sem as bobinas, (c) circuito de acionamento do sensor hall FTC S276, com conexões do módulo ESP8266, (d) rotor da ventoinha já fixada nos três hemisférios e (e) resultado final do anemômetro montado.

responsável por registrar a quantidade de água medida, foi utilizada uma placa metálica fina, cortada seguindo o esquema da Figura (S1) do material suplementar. Após o corte, a placa foi dobrada conforme as linhas do esquema. O resultado, após corte e dobra, é mostrado na Figura 1b, c. As peças foram coladas com cola à base de resina epóxi. Foi feito um furo central com 2 mm de diâmetro, por onde é passado um eixo de metal polido, encontrado em sucata de CD player de computador, ver Figura 1c, d. Para a construção da base da balança, foi utilizada madeira (*Dalbergia nigra*), com as dimensões mostradas no diagrama da Figura 1d. As partes que compõem a base foram coladas com cola à base de cianoacrilato. Uma placa em forma de L é colocada na frente do eixo da balança, para restringi-la a esse eixo de rotação. O resultado com a imagem final do sistema basculante é apresentado na Figura 1e, assim como todo o dispositivo montado, Figura 1f.

Para construir o anemômetro, foi utilizado uma ventoinha proveniente de fontes de computador com transdutor, gerando um sinal elétrico PWM (Pulse Width Modulation) através de um sensor Hall embutido na ventoinha quando suas pás giram. Para utilizar esta ventoinha como anemômetro é necessário modificar o seu circuito, bem como retirar todos os enrolamentos da bobina presentes. A imagem da Figura 2 abaixo mostra o rotor da ventoinha sem as pás (Figura 2a), bem como a parte interna, sem as bobinas (Figura 2b). Um circuito de acionamento do sensor Hall é mostrado na Figura 2c. Os terminais são então conectados ao microcontrolador nodemcu (esp8266). Para fixar o rotor da ventoinha às pás do anemômetro, é utilizado um

tampão de PVC com diâmetro de 1" e altura de 2 cm. O tubo é fixado ao rotor cerca de 1 cm e depois colado com cola instantânea. No trecho de 1 cm que sobrou na altura do tubo, foram feitos três furos de 2 mm de diâmetro, por onde foi fixado um parafuso em cada furo. Na outra extremidade dos parafusos, um hemisfério retirado de lâmpada LED descartada foi fixado, servindo como pás para interagir com o vento (Figura 2d). A base da ventoinha foi então fixada sobre uma base de madeira  $10 \times 2 \times 2$  cm, que foi envolvida com fita adesiva asfáltica para proteção contra intempéries do tempo. Também foi utilizado um hemisfério para cobrir o tubo de PVC, servindo como cúpula central para o anemômetro (Figura 2e). A imagem da Figura 2 apresenta o resultado final do anemômetro montado.

O anemômetro desenvolvido foi calibrado utilizando um anemômetro padrão modelo (THAR-185) da marca Instrutherm, cuja curva de calibração é apresentada na Figura (S2) do material suplementar. Quando comparado com a equação para o movimento circular para a velocidade tangencial  $v = 2\pi r f$ , onde  $r = 0,1$  m é o raio das pás do anemômetro e  $f$  a frequência gerada pelo dispositivo em rotação, medida pelo ESP8266, verificou-se que o ajuste coincidiu com o modelo simples da equação acima em 95%, de modo tal equação foi utilizada para converter o período da sinal PWM gerado pelo sensor hall da ventoinha em velocidade tangencial  $v$ , nas pás do anemômetro, a qual corresponde a velocidade do vento. Um esquema (Figura S3) ilustrando o princípio de funcionamento da máquina de estados desenvolvida para comunicar com o pluviômetro e o anemômetro é apresentado no material suplementar.



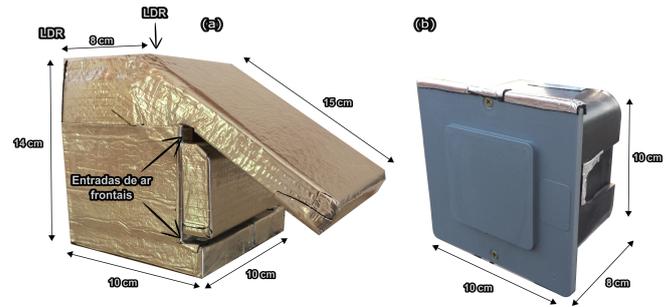
**Figura 3:** Esquema elétrico com as ligações dos sensores de temperatura, umidade relativa, pressão e luminosidade, utilizados na estação meteorológica desenvolvida.

## 2.2. Sensores de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica

Para medições de temperatura e umidade relativa foi utilizado o sensor modelo AHT10, da ASAIR. Para medições da pressão atmosférica do ar, o sensor utilizado foi o BMP180, da BOSH. Ambos os sensores trocam dados com o microcontrolador ESP8266 via comunicação I2C. As medições de luminosidade são realizadas através de um sensor LDR (Light Dependent Resistor), conectado à porta analógica  $A_0$  do ESP8266. Todo o circuito é colocado dentro do abrigo contra intempéries desenvolvido. Um esquema com as conexões do sensor ao ESP8266 é mostrado na Figura 3. Os sensores de temperatura e umidade relativa foram comparados com sensores padrão e os resultados são apresentados nos gráficos das Figuras (S4) e (S5) do material suplementar. Pelo fato de os dados dos sensores concordarem bem com os valores dos sensores padrão, optou-se em não realizar um ajuste numérico para obtenção de uma curva de ajuste.

## 2.3. Construção do abrigo meteorológico para os sensores e do abrigo para a central eletrônica

Para abrigar os sensores utilizados na estação, foi construído um abrigo meteorológico utilizando madeira. A Figura 4 apresenta as dimensões e o resultado final. Após o acabamento da madeira, seu interior foi pintado de branco e o exterior foi vedado com fita adesiva asfáltica, a fim de proteger a estrutura do abrigo da água da chuva e da luz solar, bem como manter o ambiente interno do abrigo, onde estão localizados sensores de temperatura, umidade relativa e pressão, com menor influência da capacidade térmica do abrigo, que poderia funcionar como estufa, tornando a estação meteorológica imprecisa. O sensor de luz é colocado no exterior do abrigo (Figura 4a). Uma caixa plástica impermeável (Figura 4b) foi fornecida para abrigar o ESP8266. Os sensores foram fixados dentro do abrigo meteorológico,



**Figura 4:** (a) Dimensões do abrigo desenvolvido. (b) caixa plástica lacrada adquirida para abrigar a unidade de controle eletrônico, contendo o microcontrolador ESP8266.

e através de cabos ele foi conectado ao microcontrolador. Por fim, foi fornecida uma haste metálica para sustentação de toda a estação, e sua base foi fixada em um bloco de concreto, para garantir estabilidade à estação.

## 2.4. Programação do dispositivo, sensores e envio de dados para Ubitods

Após realizadas as conexões elétricas ao ESP8266, foram programados os sensores, anemômetro e pluviômetro. Para conectar o dispositivo à rede de internet, o ESP8266 foi conectado ao servidor Ubdots, utilizando a biblioteca *Ubidots.h* [<https://github.com/ubidots>]. O site é um construtor de aplicações de Internet das Coisas (IoT) com análise e visualização de dados. O ESP8266 foi programado usando a linguagem de programação C++. O código desenvolvido conectando todos os sensores e dispositivos utilizados é disponibilizado em [<https://github.com/wphysics/weather-station>]. Para saber o índice pluviométrico foi realizada uma calibração medindo o volume de água derramado pelo balde e a área de captação do pluviômetro. Com o auxílio de uma pipeta foram feitas 10 medições do volume de água derramado pelo balde, chegando a um volume de  $V = 7,10$  ml. Como o raio de captação do pluviômetro desenvolvido é igual  $R = 1,60$  cm, a área será  $A = \pi R^2 = 105,70$  cm<sup>2</sup>. Desta forma, a altura da chuva coletada, ou índice pluviométrico, é obtida fazendo:

$$V = A.h \rightarrow h = \frac{V}{A} = \frac{7,10}{105,70} = 0,067 \text{ cm} = 0,67 \text{ mm.} \quad (1)$$

Portanto, a precipitação pluviométrica, em milímetros, pode ser obtida multiplicando o volume da balsa pelo número  $n$  de vezes que ela é despejada, onde  $n$  é obtido contando o número de vezes em que o sensor reed switch é acionado.

$$\text{Precipitação [mm]} = 0,67.n. \quad (2)$$

### 2.5. Estimativas dos pontos de orvalho e do índice de conforto térmico

Para obtenção das faixas de conforto térmico, utilizando a temperatura efetiva ( $T_E$ ) e a temperatura efetiva obtida levando em consideração a velocidade do vento ( $T_{EV}$ ), utilizando as equações 3 e 4 a seguir, foi possível obter tais índices de importante interesse meteorológicos [16–19].

Para  $v \leq 0,2 \text{ m/s}$ :

$$T_E = T - 0,40(T - 10) \left(1 - \frac{H}{100}\right), \quad (3)$$

Para  $v > 0,2 \text{ m/s}$ :

$$T_{EV} = 37 - \frac{37 - T}{(0,68 - 0,0014 H + \frac{1}{1,76 + 1,40 v^{0,75}})} - 0,29 T \left(1 - \frac{H}{100}\right). \quad (4)$$

onde  $T$  é a temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $H$  é a umidade relativa (%) e  $v$  é a velocidade do vento ( $\text{m/s}$ ).

Para estimar a temperatura do ponto de orvalho, temperatura na qual o ar se torna saturado com vapor d'água, resultando na condensação do vapor em gotas de água, foi utilizado a equação conhecida como fórmula de Magnus [20, 21]:

$$T_{OV} = \frac{b \left(\log\left(\frac{H}{100}\right) + \left(\frac{aT}{b+T}\right)\right)}{a - \log\left(\frac{H}{100}\right) + \left(\frac{aT}{b+T}\right)}, \quad (5)$$

onde os valores de  $a$  e  $b$  são definidos em função da temperatura típica local. Para temperaturas entre  $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$ , os valores das constantes são  $a = 17,37$  e  $b = 238,88$  [22]. Para outras faixas de temperatura há diferentes constantes utilizadas para o cálculo. Caso seja necessário a adequação desses valores, pode-se consultar Buck, A.L. (1981).

### 2.6. Estimativas da pressão de vapor e da água precipitável

O vapor de água presente na atmosfera desempenha um papel fundamental no impulsionamento de muitos fenômenos meteorológicos significativos, com destaque para a ocorrência de precipitação, mas também é o principal “gás” do efeito estufa, pois é um importante agente de absorção da radiação solar [21], além de ser indispensável para vida na Terra. O conhecimento sobre sua dinâmica na atmosfera é objeto de grande interesse, uma vez que a dinâmica do vapor d'água exerce influência crucial na regulação dos processos atmosféricos e no comportamento dos padrões climáticos em diferentes regiões do mundo. A pressão de vapor saturado é a máxima pressão que o vapor de água presente na atmosfera, a uma determinada temperatura, pode exercer em uma determinada área, indicando o

equilíbrio entre a evaporação e a condensação da água. Para obter uma estimativa da pressão de vapor saturado, foi utilizado a equação de Tetens [21, 23]. Para  $T \geq 0^{\circ}\text{C}$ :

$$e_s[\text{hPa}] = 6,1078 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T}{237,3 + T}}. \quad (6)$$

A partir da definição da umidade relativa do ar, podemos obter a razão entre a pressão de vapor real  $e_0$  (que iremos utilizar para estimar a água precipitável) e a pressão de vapor saturado  $e_s$ :

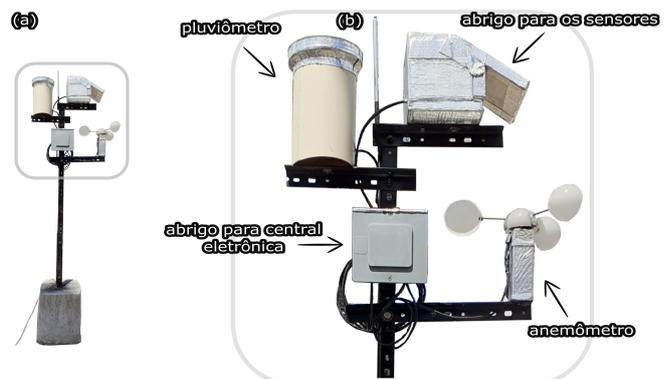
$$e_0[\text{hPa}] = e_s \cdot \frac{UR}{100}. \quad (7)$$

A água precipitável  $W$  é uma medida da quantidade total de água presente na atmosfera em forma de vapor d'água, que pode gerar precipitação, caso as demais condições atmosféricas sejam favoráveis. Essa medida corresponde à altura do filme de água que se formaria sobre a superfície do solo, se todo o vapor fosse transformado em água líquida [21]. Em outras palavras, a água precipitável é uma indicação do potencial de chuva ou outras formas de precipitação em um determinado momento e local. Monitorá-la é essencial para compreender o comportamento atmosférico e aprimorar as previsões meteorológicas, contribuindo para a compreensão dos padrões climáticos e eventos de precipitação. A equação (8) apresenta um modelo obtido em VIANELLO e ALVES (2012) utilizado para previsão nesse trabalho.

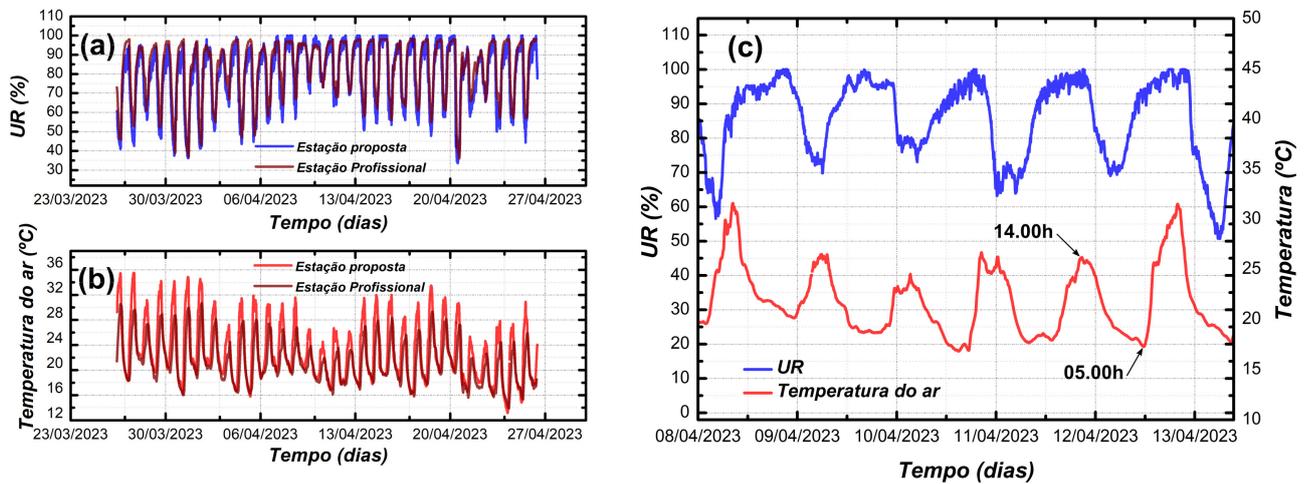
$$W(\text{mm}) = 475 \cdot \frac{e_0(\text{hPa})}{T(^{\circ}\text{C}) + 273,15}. \quad (8)$$

## 3. Resultados e Discussão

A imagem da Figura 5 apresenta o resultado final da estação meteorológica, com todos os dispositivos e sensores devidamente alocados e fixados na haste de metal presa à base de concreto. A alimentação elétrica de todo o sistema foi feita com uma fonte de celular (carregador) de 5V-800mA, conectado a rede elétrica de



**Figura 5:** (a) Visão integral da estação meteorológica desenvolvida; (b) visão dos elementos da estação.



**Figura 6:** Medidas da temperatura (a) e da umidade relativa do ar (b) durante o período analisado (26/03/2023 a 26/04/2023), obtidas pela estação proposta neste trabalho e por uma estação profissional. Em (c), recorte das medidas de temperatura e umidade relativa do ar num período de seis dias obtido pela estação proposta.

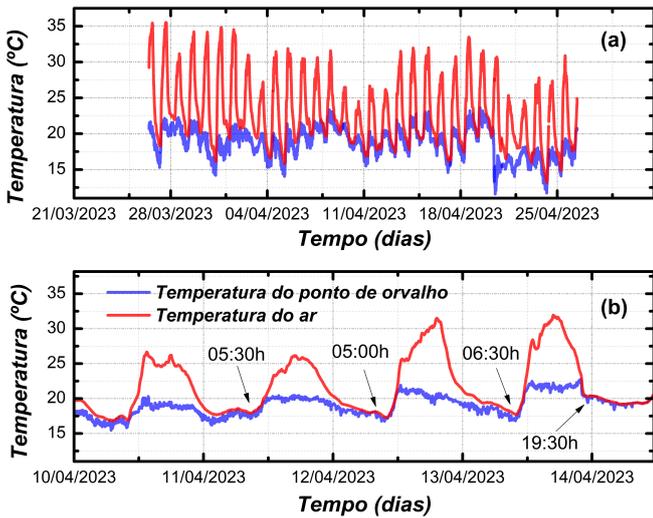
127V. A posição dos sensores em relação ao solo é de 1,5 m, estando localizada no município de Viçosa – MG, Brasil ( $20^{\circ} 45' 1,36''$  S;  $42^{\circ} 47' 14,85''$  O). Com a estação meteorológica finalizada e em operação, programada para registrar as medidas a cada 5 minutos, iniciou-se a coleta de dados, cujos resultados são apresentados a seguir.

Com a estação montada e coletando dados, por meio da plataforma Ubidots foi possível salvar e analisar os dados. O conjunto de dados coletados pela estação indicam as condições de estabilidade ou instabilidade do ar atmosférico, sendo considerado estável o estado atmosférico no qual os movimentos atmosféricos ascendentes estão ausentes, enquanto que a instabilidade está relacionada ao estado atmosférico no qual prevalecem movimentos verticais, que estão associados a processos de convecção, turbulência, formação de nuvens, etc [21]. Utilizando o software Origin pro 8.5, fez-se os gráficos de todas as variáveis coletadas. Os gráficos da Figura 6 apresentam a variação da temperatura e umidade relativa do ar. No gráfico da Figura 6a, b, comparamos os valores obtidos pela estação proposta com aqueles obtidos por uma estação profissional (código da estação: A510), distante 8,3 km em linha reta ( $20^{\circ} 45' 45,51''$  S;  $42^{\circ} 51' 50,59''$  O), posicionada a mesma altitude que a estação proposta (700 m). Nota-se que os valores obtidos pela estação proposta seguem a mesma tendência daqueles obtidos pela estação profissional, indicando uma ótima acurácia das medidas realizadas com a estação proposta. Os dados da estação profissional estão disponíveis em (<https://bdmep.inmet.gov.br>). A variação diária da temperatura do ar está diretamente relacionada com a incidência de energia solar na atmosfera, aquecendo-a. Assim como observado por VIANELLO e ALVES (2012), as temperaturas máximas em Viçosa – MG geralmente são registradas entre 14 e 15 horas, enquanto que as mínimas ocorrem antes do nascer do sol, como

apresentado no gráfico da Figura 6c. A temperatura do ar e a umidade relativa apresentam uma relação inversa, ou seja, quando uma aumenta, a outra diminui. Esse padrão é comum, a menos que ocorra um significativo acréscimo de vapor d'água na atmosfera, com consequência, por exemplo, na ocorrência de precipitação [21]. No gráfico da Figura 6c é possível observar tal padrão até o dia 11/04/2023 e, a partir daí, a temperatura e umidade relativa do ar passam a ter o mesmo comportamento, seja aumentando ou diminuindo, juntas. Tal mudança pode estar relacionada a alterações na atmosfera devido à precipitação, de cerca de 13 mm, registrada pela estação no dia 13/04/2023.

Em meteorologia, o termo “umidade atmosférica” se refere à presença de vapor d'água na atmosfera, não à presença de água nas formas líquida ou sólida. Está relacionada com a razão de mistura de ar, definida com a relação entre a massa de vapor d'água contida numa amostra de ar pela massa de ar seco (sem vapor d'água) presente nessa amostra [21, 24, 25]. Em certas condições, o ar pode ficar saturado de vapor d'água, culminando na formação do orvalho, decorrente da condensação do vapor d'água presente na atmosfera quando a temperatura do ar diminui e a umidade relativa aumenta. Quando o ar é resfriado a pressão constante (resfriamento isobárico), mantendo-se também constante a quantidade de vapor d'água presente no ar, pode-se definir a temperatura do ponto de orvalho,  $T_{OV}$ , que, em outras palavras, é a temperatura na qual a quantidade de vapor presente na atmosfera estaria em sua máxima concentração, a pressão constante. Uma vez atingida a saturação do ar de vapor d'água (umidade relativa igual a 100%), qualquer resfriamento adicional implicará na condensação do vapor d'água, formando o orvalho. O gráfico da Figura 7 apresenta os dados coletados para o ponto de orvalho.

A estação indicou a formação de orvalho nos horários destacados na Figura 7b, onde a curva para

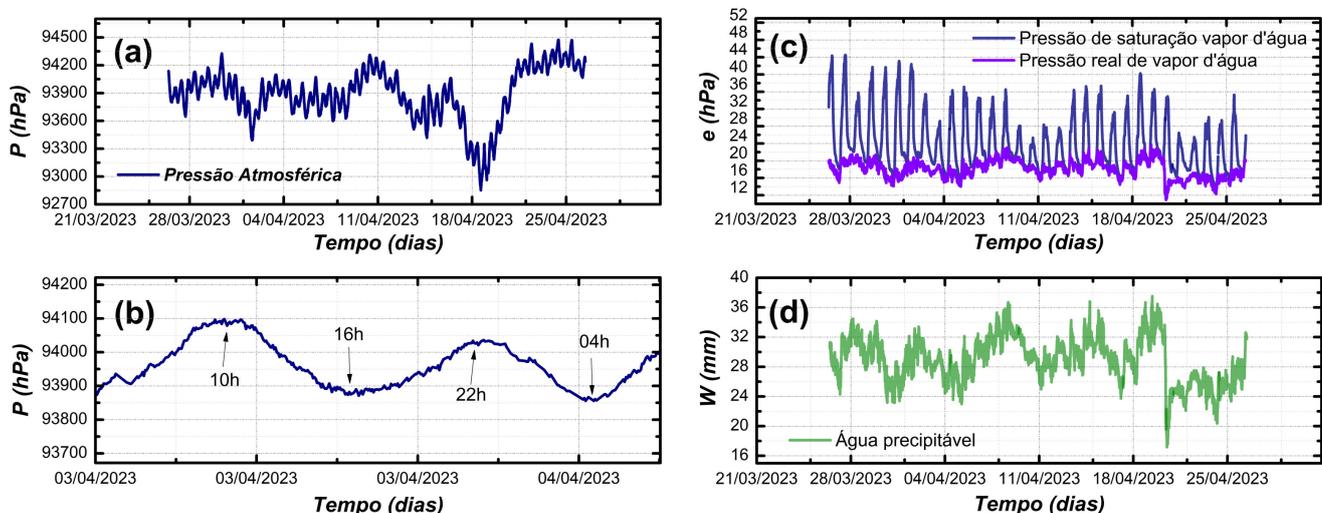


**Figura 7:** Estimativa da temperatura do ponto de orvalho  $T_{OV}$  comparado a temperatura do ar (a) ao longo dos dias analisados, e, em (b), recorte de 5 dias indiciado o horário onde  $T_{OV}$  se iguala a temperatura do ar.

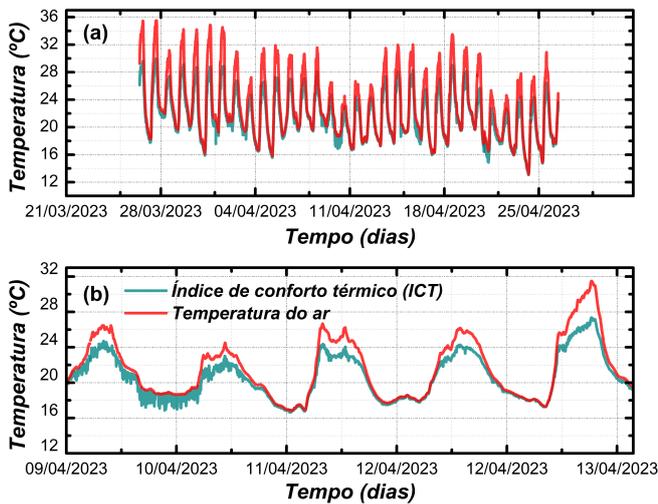
a temperatura do ponto de orvalho toca a curva da temperatura do ar, indicando que o ar tem as condições para a formação do orvalho. Tal fenômeno ocorre com frequência sobre superfícies sólidas próximas ao solo, que se resfria durante a noite por, principalmente, processos irradiativos que, no fim da madrugada, podem atingir a temperatura igual a  $T_{OV}$ , dando início ao processo de condensação e formação do orvalho. Como a variação da pressão atmosférica é pequena em uma dada camada de ar de poucos metros, como observado no gráfico da Figura 8a, b, podemos considerar um resfriamento isobárico, de modo que a descrição fenomenológica acima realizada pode ser aplicada para entendimento de tal processo.

Caso a região em análise esteja sob o domínio de uma massa de ar estacionária, variações na pressão atmosférica podem ser medidas. Nesse caso, em 24 horas ocorrem duas ondas nas séries de pressões medidas, com dois picos as 10 e 22h e dois vales as 4 e 16h, configuração essa conhecida com maré barométrica, que tem origem térmica, associada a forte absorção da radiação solar pelo ozônio estratosférico e pelo vapor d'água na troposfera [21]. Valores semelhantes para os máximos e mínimos de pressão associados a maré barométrica foram encontrados por [26]. Um possível indicativo da mudança do tempo e da chegada de tempestades é a presença de uma queda acentuada da pressão, entretanto, Adil et al. relatam que em regiões tropicais, onde as variações da pressão são em geral pouco destacáveis, é difícil distinguir tais variações locais da maré barométrica. O gráfico da Figura 8a apresenta os dados da pressão atmosférica local coletados durante o período analisado, sendo o gráfico da Figura 8b um recorte dentro destas medidas, com destaque para os efeitos da maré barométrica. No dia 18/04 pode-se observar que houve uma queda na pressão destacável da maré barométrica, indicando um possível deslocamento de massas de ar.

A quantidade de vapor d'água presente na atmosfera é variável, podendo o ar estar ou não em condições de saturação. Quando o ar está saturado, a pressão real de vapor, ou seja, a pressão exercida pelo vapor d'água na atmosfera, corresponderá à pressão de saturação. No entanto, caso o ar não esteja saturado, a pressão real de vapor será menor do que aquela que prevalece em condições de saturação, para a mesma temperatura [21]. Da equação (7), pode-se concluir que a pressão real de vapor d'água coincide com o valor da pressão de saturação de vapor d'água quando RH é igual a 100%. Tal igualdade pode ser verificada no gráfico da Figura 8c,



**Figura 8:** Em (a) e (b), medida da pressão atmosférica local, com destaque para o efeito da maré barométrica em (b). Em (c), curvas estimadas utilizando a equação (6) e (7) para  $e_0$  e  $e_s$ . Em (d), a estimativa da água precipitável de acordo com a equação (8).



**Figura 9:** Estimativa do ICT comparado a temperatura do ar (a), e com destaque de 5 dias (b), onde pode-se observar que, ao longo do dia, os valores do ICT são distintos em torno de  $3^{\circ}\text{C}$  da temperatura do ar e, ao longo da noite, tendem a coincidir.

que atinge os valores máximos nos períodos noturnos, nos dias em que RH atinge valor máximo.

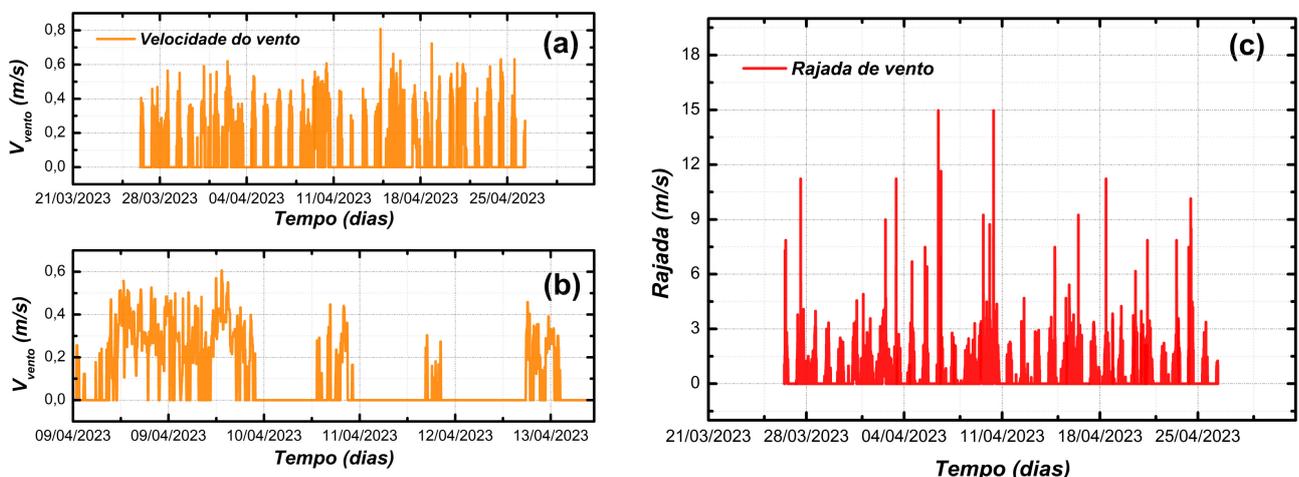
A estimativa da água precipitável é fundamental para prever a disponibilidade de vapor d'água que pode se condensar e formar precipitação (chuva), sendo particularmente importante para atividades agrícolas, onde a disponibilidade de água é essencial para o crescimento das culturas. A partir da equação (8), podemos inferir que existe uma relação direta entre a pressão real de vapor d'água na atmosfera e a quantidade de água precipitável sendo que, quanto maior a pressão real de vapor d'água da atmosfera, maior a quantidade de água precipitável. Essa relação pode ser verificada nos gráficos da Figura 8c, d.

O índice de conforto térmico (ICT) é estimado utilizando as equações 3 e 4, e como para estimá-lo utilizamos

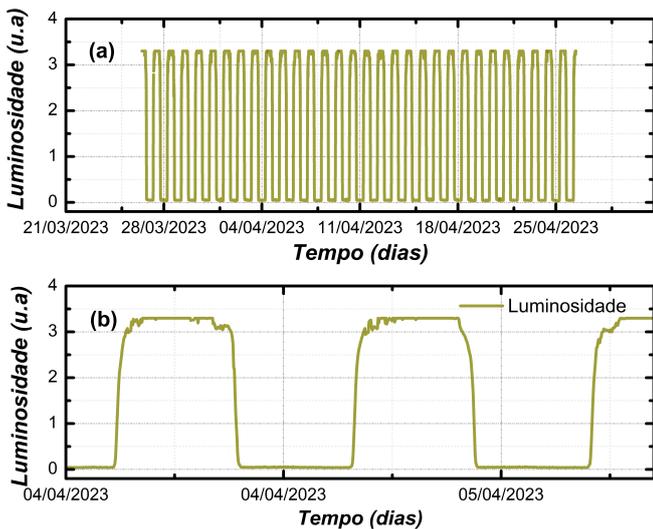
a temperatura efetiva com e sem vento, o ICT tem a unidade da temperatura utilizada. Ele é uma medida que leva em consideração a temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento para avaliar a sensação térmica de uma pessoa. Tal índice ajuda a quantificar o conforto ou desconforto em relação às condições climáticas, auxiliando na previsão de situações de calor excessivo ou frio intenso [18]. O gráfico da Figura 9a, b apresenta o resultado obtido pela estação proposta, medida no início do outono durante o período analisado (26/03/2023 a 26/04/2023), para a ICT juntamente com a temperatura do ar, para fins de comparação. Nota-se que o ICT tendeu a coincidir com a temperatura do ar durante a noite. Isso ocorre em situações onde as condições climáticas permanecem relativamente estáveis ao longo da noite, com clima ameno, baixa umidade e pouca variação de temperatura durante a noite. Nessas condições, a sensação térmica tende a estar próxima da temperatura do ar, já que não há fatores climáticos extremos que afetem significativamente a percepção de calor ou frio [18]. Nota-se também que, como se observa no período do dia 09/04 a 10/04, há uma perturbação na curva do ICT, causando uma espécie de ruído, o que não se observa nos dias seguintes. Na verdade, trata-se do efeito da velocidade do vento, como destacado para o mesmo período no gráfico da Figura 10b, que afeta de forma significativa a percepção humana do conforto térmico.

Os gráficos da Figura 10a e b apresentam os resultados da medida da velocidade do vento em m/s, onde verifica-se que, a partir do dia 10/04, as noites foram calmas, com ar perto da superfície com pouco ou quase nenhum movimento. O gráfico da Figura 10c é obtido por meio dos picos de rotação máximos do anemômetro, denominados rajadas de vento, atingindo velocidades de até 15 m/s no período analisado (início do outono).

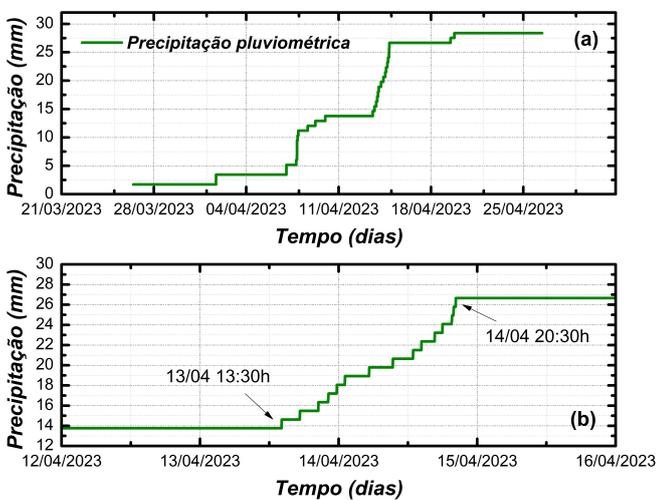
Uma medida associada à luminosidade foi realizada e é apresentada no gráfico da Figura 11a, b. Como



**Figura 10:** Medida da velocidade do vento, cujos pontos são uma média das medições num período de 5 minutos (a e b). Em (c), medida das rajadas de vento obtidas durante o mesmo período, a partir da frequência máxima gerada pelo anemômetro.



**Figura 11:** Em (a), luminosidade ao longo do período analisado. Em (b), destaque a curva de luminosidade ao longo de dois dias. O sinal gerado se assemelha a uma onda quadrada, por meio da qual pode-se estimar o período dos dias e das noites, medindo-se o platô inferior e superior, respectivamente.



**Figura 12:** Precipitação coletada pelo pluviômetro proposto, sendo que, em (a), é apresentado a precipitação durante todo o período analisado e, em (b), um recorte de um dia chuvoso.

o objetivo inicial era conhecer apenas a duração dos dias e noites, não foi necessário calibrar o sensor LDR. Caso seja necessário obter uma quantidade associada a luminosidade, por exemplo, em watts por metro quadrado, ou outra unidade equivalente, pode-se calibrar o sensor LDR de acordo com [27]. A radiação solar é o fluxo de energia emitida pelo Sol sob a forma de radiação eletromagnética [28]. Ela desempenha um papel central na dinâmica atmosférica, uma vez que fornece a energia necessária para aquecer a atmosfera (Figura 6c), impulsionando correntes de ar e a formação de ventos e, conseqüentemente, o clima global [29].

Por fim, analisamos a precipitação pluviométrica, cujos resultados são apresentados no gráfico da Figura (12a, b). A medida da quantidade de precipitação (chuva), assim como a estimativa da taxa na qual uma dada precipitação ocorreu, é uma quantidade importante para se tomar decisões acerca de impactos causados pela chuva, tanto na agricultura como na defesa civil, gerando alertas sobre possíveis desastres. A taxa de precipitação mais acentuada no período analisado foi entre as 13:30h do dia 13/04/23 às 20:30h do dia 14/04/23. Medindo a inclinação da curva nesse período, foi obtido uma taxa de precipitação média igual a 0,5 mm/h.

#### 4. Conclusão

Conclui-se que a construção de uma estação meteorológica a partir de sensores de baixo custo e materiais reutilizáveis surge como uma alternativa viável, possibilitando a obtenção de dados meteorológicos precisos a um custo acessível e promovendo a sustentabilidade ambiental. Essa estação apresenta grande potencial para contribuir de forma significativa, tanto a nível educacional como na agricultura, especialmente em países em desenvolvimento, ao aprimorar o entendimento das condições climáticas. Os professores podem trabalhar os conceitos da física atmosférica de forma prática, promovendo o estímulo à ciência cidadã e à pesquisa participativa. A estação demonstrou ser estável e reprodutível, resultando na produção de outras estações similares. Utilizando materiais reaproveitados e sensores de baixo custo, nossa estação meteorológica se torna acessível a um maior número de pessoas, permitindo que elas tenham acesso a informações precisas sobre o tempo. Além disso, a reutilização de materiais descartados contribui para a redução do impacto ambiental, alinhando o projeto com princípios de sustentabilidade e conscientização ambiental.

#### Material Suplementar

O seguinte material suplementar está disponível online:

Figura S1 – Esquema com as dimensões para o corte da báscula. Um arquivo .svg, para impressão em folha A4 com esse esquema  disponibilizado em [https://github.com/wphysics/weather-station].

Figura S2 – Ajuste numérico entre medidas realizadas com o anemômetro (THAR-185) e a equao proposto para velocidade do vento ( $v = 2\pi r f$ ), obtendo uma correlao entre os valores de 95%.

Figura S3 – (a) esquema da máquina de estados para o pluviômetro, (b) para o anemômetro.

Figura S4 – Comparao entre medidas realizadas com o sensor de temperatura industrial (LI-1400-104) e o sensor AHT10.

Figura S5 – Comparao entre medidas realizadas com o sensor de umidade industrial (LI-1400-104) e o sensor AHT10.

## Referências

- [1] K.E. Ukhurebor, S. Azi, C.I. Abiodun e E. Enoyose, *Physical Science International Journal* **14**, 32862 (2017).
- [2] S. Tenzin, S. Siyang, T. Pobkrut e T. Kercharoen, em: *9th International Conference on Knowledge and Smart Technology* (Chonburi, 2017).
- [3] J.S. Botero-Valência, M. Mejia-Herrera e J.M. Pearce, *HardwareX* **11**, e00267 (2022).
- [4] D.D. Khandelwal e M. Singhal, *Weather* **76**, 60 (2019).
- [5] K. Ioannou, D. Karampatzakis, P. Amanatidis, V. Aggelopoulos e I. Karmiris, *Information* **12**, 146 (2021).
- [6] K. Chan, D.N. Schillereff, A.C. Baas, M.A. Chadwick, B. Main, M. Mulligan, F.T. O'shea, R. Pearce, T.E. Smith, A. van Soesbergen et al., *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* **45**, 305 (2021).
- [7] R.L. Vianello, *A estação meteorológica e seu observador: Uma parceria secular de bons serviços prestados à humanidade* (INMET, 2011).
- [8] BRASIL. Decreto nº 8.852, de 20 de setembro de 2016 (*Regimento interno do Instituto Nacional de Meteorologia*). Brasília, 2018.
- [9] R.B. Silva, L.S. Leal, L.S. Alves, R.V. Brandão, R.C.M. Alves, E.V. Klering e R.P. Pezzi, *Revista Brasileira em Ensino de Física* **37**, 1505 (2015).
- [10] A.A.M. Santos, H.S. Amorim e C.P. Dereczynski, *Revista Brasileira em Ensino de Física* **39**, 1505 (2017).
- [11] M.J. Alam, S.A. Rafi, A.A. Badhan, M.N. Islam, S.I. Shuvo e A.M. Saleque, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 127 (2020).
- [12] A. Antonini, L. Bini, G. Rafanelli e I. Cantini, em: *IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops)* (Como, 2020).
- [13] G.F.L.R. Bernardes, R. Ishibashi, A.A.S. Ivo, V. Rosset e B.Y.L. Kimura, *Digital Communications and Networks* **9**, 941 (2022).
- [14] D.K. Singh, H. Jerath e P. Raja, em: *International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM)* (Dubai, 2020).
- [15] A.S. Priambodo e A.P. Nugroho, *Journal of Physics: Conference Series* **1737**, 012009 (2021).
- [16] F.C. Houghton e C.P. Yaglou, *Journal of the American Society of Heating and Ventilating Engineers* **29**, 165 (1923).
- [17] Z. Suping, M. Guanglin, W. Yanwen e L. Ji, *International Society of Biometeorology* **36**, 63 (1992).
- [18] A.S. Nedel, F.L.T. Gonçalves, C. Macedo Junior e M.R.A. Cardoso, *Revista Brasileira de Geofísica* **33**, 185 (2015).
- [19] J.P.A. Gobo, E. Galvani, C.A. Wollmann e F.L.T. Gonçalves, *Revista do Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo spe*, 129 (2018).
- [20] B. Bou-Fakhreddine, I. Mougharbel, A. Faye e Y. Pollet, *Journal of Environmental Management* **241**, 502 (2019).
- [21] R.L. Vianello e A.R. Alves, *Meteorologia básica e aplicações* (Editora UFV, Viçosa, 2012), 2 ed.
- [22] A.L. Buck, *J. Appl. Meteorol.* **20**, 1527 (1981).
- [23] O.A. Alduchov e R.E. Eskridge, *Journal of Applied Meteorology and climatology* **35**, 601 (1996).
- [24] J.V. Iribarne e H.R. Cho, *Atmospheric Physics* (D. Reidel, Boston, 1980).
- [25] J.V. Iribarne e W.L. Godson, *Atmospheric Thermodynamics* (Springer, Heidelberg, 1981).
- [26] L.R.M. Carvalho e H.S. Amorim, *Revista Brasileira em Ensino de Física* **36**, 3501 (2014).
- [27] P.V. Alves, L.H.S. Reis, C.A.S. Querino, M.A.L. Moura, A.A. Feitosa Junior e P.A.S. Martins, *Revista Brasileira em Ensino de Física* **42**, e20190304 (2020).
- [28] J.M.R. Gómez, F. Carlesso, L.E. Vieira e L. Da Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e3312 (2018).
- [29] C.D. Ahrens e R. Henson, *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and the Environment* (Cengage Learning, Boston, 2018), 12 ed.