

PROTÓTIPO DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE BAIXO CUSTO

LOW-COST WEATHER STATION PROTOTYPE

PROTOTIPO DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE BAJO COSTO

// RESUMO

AUTOR

Henderson Silva Wanderley¹ 
Celita Nathalia Vasconcelos Perdigao¹ 

FILIAÇÃO INSTITUCIONAL

¹ UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

E-MAIL

hendynho@gmail.com
celitaperdigao@gmail.com

DATA DE SUBMISSÃO: 24/06/24

DATA DE APROVAÇÃO: 29/09/25

DOI: 10.12957/GEOUERJ.2025.85313



E-ISSN 1981-9021

ESTE É UM ARTIGO DE ACESSO ABERTO
DISTRIBUÍDO SOB OS TERMOS DA LICENÇA
CREATIVECOMMONS BY-NC-SA 4.0, QUE
PERMITE USO, DISTRIBUIÇÃO E REPRODUÇÃO
PARA FINS NÃO COMERCIAIS, COM A CITAÇÃO
DOS AUTORES E DA FONTE ORIGINAL E SOB
A MESMA LICENÇA.

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um protótipo de um sistema autônomo de baixo custo para a medição de elementos meteorológicos. O protótipo foi desenvolvido a partir do microcontrolador ESP 8266 com sensores-teste: BMP180, DHT22 e Termistor NTC e outros componentes. Os dados dos sensores-teste foram validados a partir estação meteorológica automática do INMET A601 – Seropédica. Foram aplicados os testes estatísticos de coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância (d). Dentre os sensores testados, o sensor BMP180 para avaliação de temperatura do ar, foi o que obteve melhor precisão e exatidão, sendo o sensor que melhor representa o conjunto de dados da estação meteorológica de referência. Além disso, os protótipos construídos representam, em média, cerca de 2,34% do custo de uma estação meteorológica automática profissional. Portanto, assim como os sensores presentes em estações meteorológicas automáticas profissionais, os sensores de baixo custo também apresentam alta confiabilidade, podendo serem aplicados para auxiliar no monitoramento, planejamento e tomada de decisão de operações agrícolas e ambientais.

Palavras-chave: Temperatura do ar; Umidade relativa; ESP 8266; Microcontrolador; Estação meteorológica

// ABSTRACT

The objective of this work is to develop a prototype of a low-cost autonomous system for measuring meteorological elements with the same reliability as professional meteorological station. The prototype was developed using the ESP 8266 microcontroller with the test sensors: BMP180, DHT22 and NTC Thermistor among other components. The data from the test sensors were validated with the automatic meteorological station INMET A601 – Seropédica. Statistical tests of correlation coefficient (r), coefficient of determination (R^2), agreement index (d) were applied. Among the sensors tested, the BMP180 sensor for air temperature assessment was the one with the best precision and accuracy, being the sensor that best represents the data set from the reference meteorological station. Furthermore, the prototypes built represent, on average, around 2.34% of the cost of a professional automatic weather station. Therefore, just like the sensors present in professional automatic meteorological stations, low-cost sensors also have high reliability and can be applied to assist in monitoring, planning and decision-making in agricultural and environmental operations.

Keywords: Air temperature; Relative humidity; ESP 8266; Microcontroller; Weather station

// RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un prototipo de sistema autónomo de bajo costo para medición de elementos meteorológicos. El prototipo se desarrolló utilizando el microcontrolador ESP 8266 con sensores de prueba: BMP180, DHT22 y Termistor NTC y otros componentes. Los datos de los sensores de prueba fueron validados desde de la estación meteorológica automática INMET A601 – Seropédica. Se aplicaron las pruebas estadísticas de coeficiente de correlación (r), coeficiente de determinación (R^2), índice de concordancia (d). Entre los sensores probados, el sensor BMP180 para evaluación de la temperatura del aire fue el que mejor precisión y exactitud logró, siendo el sensor que mejor representa el conjunto de datos de la estación meteorológica de referencia. Además, los prototipos construidos representan, de media, alrededor del 2,34% del coste de una estación meteorológica automática profesional. Por lo tanto, al igual que los sensores presentes en las estaciones meteorológicas automáticas profesionales, los sensores de bajo costo también tienen una alta confiabilidad y pueden aplicarse para ayudar en el monitoreo, la planificación y la toma de decisiones en operaciones agrícolas y ambientales.

Palabra Clave: Temperatura del aire; Humedad relativa; ESP 8266; Microcontrolador; Estacion meteorologica

INTRODUÇÃO

As condições atmosféricas e geográficas de um local são determinadas pela variação dos elementos meteorológicos como a radiação solar, pressão, temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento, precipitação. Dessa forma, tendo em vista que as atividades urbanas e agrícolas dependem das condições do tempo, é necessário que os elementos meteorológicos sejam monitorados diariamente para auxiliarem na tomada de decisão e no planejamento de atividades (Pereira et al., 2002, De Moraes et al., 2023).

A temperatura e umidade relativa do ar são elementos meteorológicos condicionantes de saúde humana, nos processos agrícolas, nas condições da fauna e da flora (Palmieri et al., 2014). Por exemplo, para que haja indução floral dos citros, a planta precisa paralisar o seu crescimento vegetativo; para isto, a planta tem que passar por um período de temperaturas baixas as quais quebram dormência de gemas floríferas e induzem as mesmas ao florescimento (Cruz et al., 2007). Além disso, a disponibilidade hídrica e sua gestão, seja ela para a irrigação ou abastecimento urbano depende do monitoramento dos elementos meteorológicos, dentre eles, temperatura e umidade relativa do ar (Da Mota et al., 2018).

O monitoramento da temperatura e umidade em ambiente é uma estratégia fundamental para desenvolver ações de redução de custos para arrefecer o ambiente, monitoramento de stress térmico, e no tratamento químico para o controle de insetos e fungos (Devilla et al., 2004). Segundo Hidalgo et al. (2014), sob elevadas temperaturas há infestação de ninfas de *Mahanarva fimbriolata* (Cigarrinha-das-raízes) e em condições de alta umidade relativa do ar, há maior infestação de adultos de cigarrinha-das-raízes (praga da cana-de-açúcar). Dessa forma, sob as condições de altas temperaturas e umidade relativa do ar há o favorecimento da infestação das cigarrinhas-das-raízes.

A observação e análise da pressão atmosférica é importante para as previsões de tempo. Este elemento meteorológico varia em diferentes pontos do planeta pela ação do vento, e das regiões de alta e baixa pressão (Fernandes, 2021). As regiões de baixa pressão do ar, na

atmosfera, indicam formação de várias nuvens, com precipitação e quando o tempo está severo, há a ocorrência de tempestades. Enquanto, as regiões de alta pressão apresentam tempo firme com céu azul ou pequena quantidade de nuvens e menor umidade relativa do ar, com tempo seco, sem precipitação (Pegorim, 2016).

Portanto, é fundamental que os elementos meteorológicos sejam monitorados pois têm grande influência para a análise de tempo e clima. Em adição a isso, a automatização do sistema de medição de elementos meteorológicos torna o processo de monitoramento mais prático, a coleta de dados mais precisa e continua. Isso beneficia processos de precisão, como monitoramento de tempo de curto prazo e atividades agrícolas, que necessitam de informações dos parâmetros meteorológicos, que auxiliam na rápida tomada de decisão e previsão de evento extremos (Pereiro et al., 2022).

A automação consiste na transformação de dispositivos de controle manual para controle automático, especialmente, aqueles dispositivos em que existem operações que estejam vinculadas a leitura de variáveis como temperatura, umidade, pressão, dentre outros (Ogata, 2010). A partir da automação os dispositivos são capazes de fazer medições e ajustes sem interferência humana, diminuindo custos devido a dispensa parcial ou total de recurso humano. (Santos, 2020).

Apesar da automação facilitar processos esta tecnologia ainda é restrita. Porém, quando aliada à internet das coisas (IoT – Internet of things) permite que os dispositivos automatizados, acessem a internet, tenham interações com uma rede de coisas e humanos interligada, fornecendo informações em tempo real e análise de dados mais abrangente Além disso, a execução de comandos com base em dados coletados a longa distância remotamente, por meio de microcontroladores, amplia significativamente o alcance e a eficácia do monitoramento (Peixoto, 2021).

Os microcontroladores são pequenos computadores que têm circuito integrado contendo todas as funcionalidades de um computador. Estes dispositivos possuem Central Processing Unit – CPU, memória RAM e ROM, portas de entrada e de saída ou as General Purpose Inputs and Outputs – GPIO e, ainda, conversores analógico/digital e digital/analógico (Assunção, 2021).

Em sistemas de automação, os microcontroladores são programados com software que permite executam tarefas a fim de controlar e monitorar sensores e atuadores (Filgueira et al., 2022).

Os microcontroladores com sistema integrado de Wi-Fi, possibilita sua conexão com à internet. Em virtude disto, os microcontroladores estão sendo cada vez mais utilizados, principalmente, no ambiente agrícola nas áreas de agricultura de precisão para plantio inteligente, controle de pulverização, monitoramento de elementos meteorológicos, por meio de estações meteorológicas de baixo custo (EMBC).

As EMBC são estações nas quais as observações dos elementos meteorológicos são feitas e transmitidas de maneira automática. Os sensores usados nestas estações convertem os elementos meteorológicos medidos em sinais elétricos que são processados e transformados em dados meteorológicos. Estes sensores estão conectados a um sistema eletrônico de aquisição de dados que registram e transmitem as informações geradas (WMO, 2021).

Deste modo, as EMBC torna-se uma alternativa para monitoramento e aquisição de dados meteorológicos, justamente devido ao seu baixo custo, precisão e possibilidade de automatização, além do alto custo de aquisição as estações meteorológicas automáticas convencionais, as quais não são acessíveis a grande parte dos produtores (Jordão et al., 2017, Carvalho et al., 2020, Regueira et al., 2022). Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver protótipo de estações meteorológicas de baixo custo.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

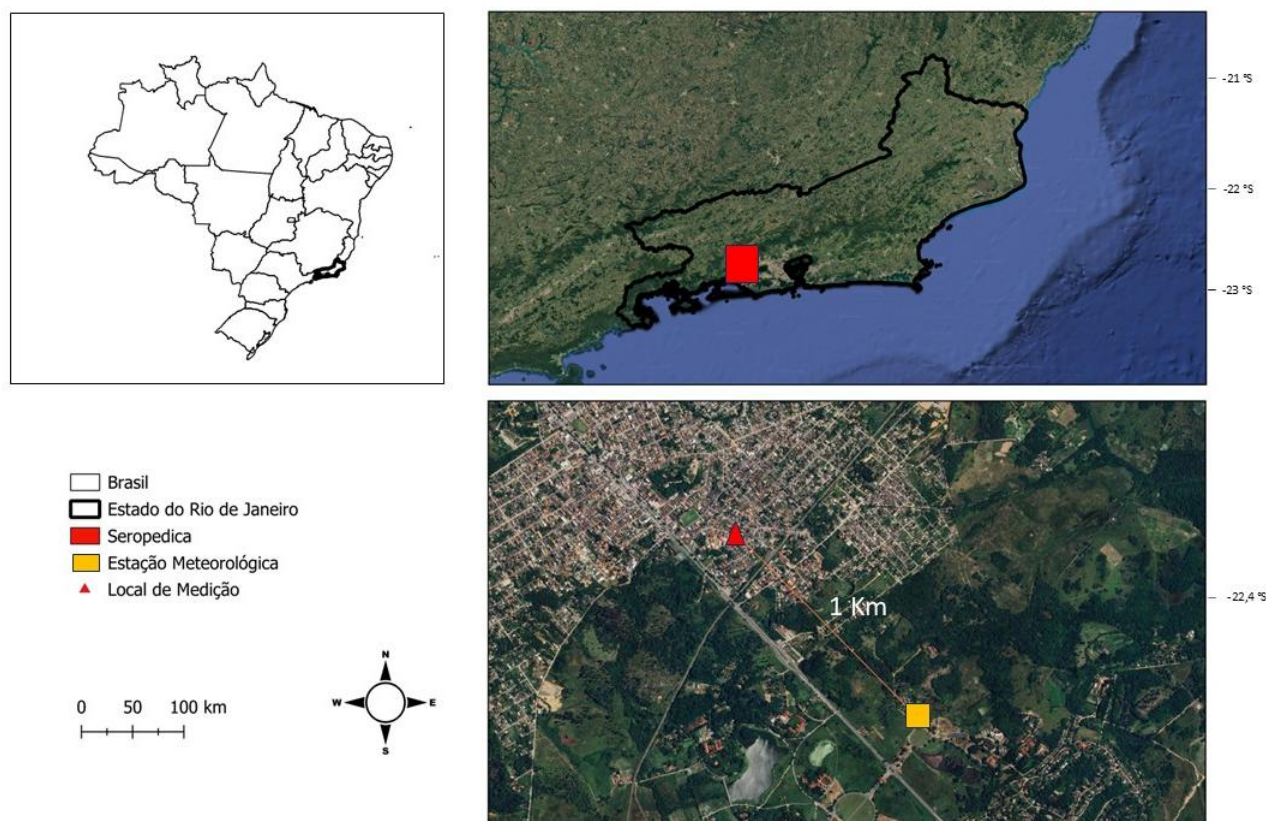
Local de Medição

A pesquisa foi realizada com as medições dos sensores-teste usados para as medições nas EMBC, a qual foi realizada no município de Seropédica-RJ. Segundo a classificação de Köppen o clima do município é classificado como Aw, com médias anuais de precipitação variam de 1.300 a 1.600 mm e temperatura entre 22 a 24°C (Alvares et al., 2013).

O desenvolvimento dos protótipos com os sensores-teste para as EMBC, a coleta de dados meteorológicos ocorreu no Laboratório de Climatologia, Científica, Aplicada e Descritiva

(LAB.CLIM) no Departamento de Ciências Ambientais, Instituto de Floresta da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (DCA-IF-UFRRJ), no município de Seropédica, estado do Rio de Janeiro (coordenadas: $22^{\circ}46'29.5''\text{S}$ e $43^{\circ}41'11.9''\text{W}$). As medições dos elementos meteorológicos com os sensores-testes das EMBC foram realizadas na Rua Volta Redonda, nº 60, no município de Seropédica, coordenadas $22^{\circ}44'52,5''\text{S}$ de latitude e $43^{\circ}41'42''\text{W}$ de longitude (Figura 1 – ponto vermelho), distante cerca de um quilometro de distância da estação do INMET.

Figura 1: Distância do local de medição dos elementos meteorológicos e estação automática de referência



Fonte: Autores (2024)

Os dados para a validação das medições realizadas com os sensores-teste das EMBC foram medidos na estação meteorológica de referência (Figura 1 – ponto amarelo). A estação de referência pertence a rede de estações meteorológica automática do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) código - A601, nome - Seropédica Ecologia Agrícola-RJ, localizada na cidade

de Seropédica-RJ, instalada nas coordenadas de 22° 45' 28" S de latitude, 43° 41' 5" W de longitude.

A parte eletrônica dos protótipos das EMBC, incluindo os sensores-teste, foram protegidas da incidência da radiação solar direta, do vento e de precipitação para evitar interferências nas suas medições (WMO, 2021). O abrigo usado na proteção dos sensores-teste foi impresso em impressora 3D (Creality), o qual foi confeccionado em filamento PLA (Ácido Polilático) branco, com o formato cilíndrico, com 12 cm de largura, 16 cm de altura (Figura 2). O abrigo foi colocar ao ar livre a uma distância de 150 cm de altura em um mastro em uma superfície coberta por grama.

Figura 2: Abrigo para as medições



Fonte: Autores (2024)

Medições

As medições foram feitas a partir de dois protótipos de EMBC (Estação A e Estação B) compostos de três sensores-teste de temperatura, um de umidade relativa de ar e um de pressão atmosférica para coleta dos dados. A coleta dos dados meteorológicos ocorreu de forma simultânea entre os protótipos e a estação meteorológica de referência durante 8 dias contínuos, no período de 23/12/2023 a 31/12/2023, com intervalos de uma hora totalizados quase 200 dados. Os dados coletados no sistema em desenvolvimento tinham uma programação de medição com leituras da temperatura e umidade relativa do ar e pressão atmosférica, a cada minuto.

As medições dos elementos meteorológicos usadas, para o processamento dos testes estatísticos e validações das medições dos protótipos das EMBC estão no intervalo horário, semelhantes aos medidos na estação meteorológica de referência. As medições realizadas com a estação meteorológica de referência passaram pelo processo de correção de seu fuso horário GMT-3 para o formato UTC, sendo subtraída 3 horas, para a adequação do fuso horário oficial do Brasil.

Sensores Utilizados

Para o desenvolvimento dos protótipos das EMBC foi utilizada placa microcontrolador ESP8266 NodeMCU, programável na interface de desenvolvimento do Arduino (Arduino IDE - Arduino Integrated Development Environment), com conversor serial-USB, módulo ESP12E responsável pela comunicação Wi-Fi e execução da lógica programável. O ESP8266 possui regulador de tensão 3,3V, 16 pinos GPIOs (General Purpose Input/Output) entradas e saídas digitais e analógicas de uso geral, barramento SPI (Serial Peripheral Interface) e I2C para comunicação mestre-escravo (Peixoto, 2021).

Ao microcontrolador foram conectados os sensores de temperatura, umidade relativa do ar e de pressão atmosférica. Os sistemas de controles foram constituídos por um sensor de temperatura e umidade relativa do ar, com entrada digital (DHT22 AM2302). O DHT22 é

constituído por um sensor de umidade relativa do ar capacitivo de polímero e um termistor (Santos, 2020). Além do sensor DHT22, foi usado o sensor de temperatura do tipo termistor modelo NTC-MF52A 10K, de coeficiente de temperatura negativo (Negative Temperature Coefficient - NTC). O termistor NTC diminui sua resistência conforme aumenta a temperatura. Por ter este comportamento os sensores NTC têm uma relação não-linear.

Também foi utilizado o sensor de Pressão atmosférica e temperatura digital BMP180 (BMP180 HW-596 GY-68). O sensor de pressão atmosférica digital BMP180 foi feito para se conectar a um microcontrolador via o barramento I2C. É constituído por um sensor piezorresistivo, um conversor analógico digital, uma memória E2PROM e uma interface serial I2C. Aos protótipos das EMBC foram introduzidos modulo leitor/gravador das informações coletadas em cartão micro SD com comunicação SPI. O módulo leitor/gravador de cartão micro SD gravava as informações dos dados de temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, sendo possível criar um histórico das leituras feitas por estes sensores.

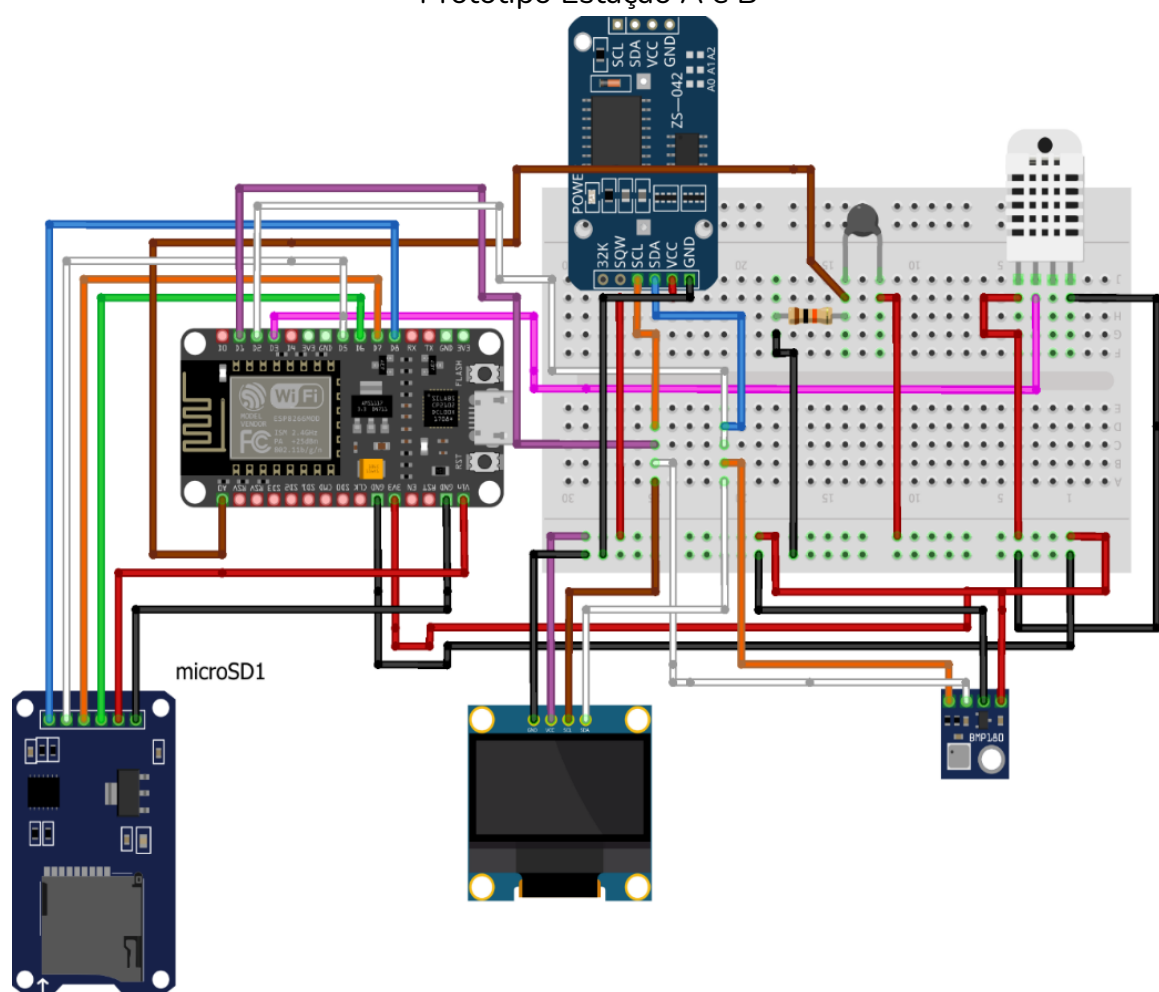
As informações do horário e data das medições foi realizada com o uso de um módulo de relógio em tempo real (RTC DS3231) com interface I2C. O real time clock (RTC) DS3231 ou relógio em tempo real DS3231 fornece informações de hora, minutos, segundos, dia, data, mês e ano, para os dados medidos. Aos protótipos das EMBC foram incluídos ainda displays LCD's com módulo I2C para interação homem-máquina. Os displays LCD's foram usados juntamente com microcontroladores para possibilitar uma interação visual entre o usuário e a máquina. Assim, estes dispositivos mostram o que o microcontrolador está executando, lendo, medindo, dentro outros.

Circuito Eletrônico

A fonte de energia alimentadora do circuito foi a rede elétrica convencional, porém, a fonte usada para alimentação foi uma fonte de carregador de celular cuja tensão e corrente de saída é de 5V e 2,0A, respectivamente. O módulo RTC DS3231, o sensor BMP180 e ambos os displays têm a porta de comunicação I2C (Figuras 3). Assim, os três componentes estão conectados nas

portas SCL (Serial Clock) – pino digital D1 e SDA (Data) – pino digital D2. Todos os três componentes são alimentados por 3,3V e têm saída para o pino GND (terra). O sensor NTC 10k Ohm também é alimentado por 3,3V. Este está conectado na porta analógica A0 e com um resistor de 10K Ohm, conectado ao pino terra. O módulo Leitor/Gravador micro SD possui comunicação SPI (Interface Periférica Serial), o que permite sua conexão com qualquer dispositivo que tenha comunicação SPI. O MISO foi conectado ao pino digital D6 e D7, juntamente com o SCL conectado ao pino digital D5, o VCC foi alimentado por 3,3V e o pino terra conectado no pino GND. O sensor digital DHT22 foi conectado ao pino digital D3, alimentado pela tensão de 3,3V e ao pino terra.

Figura 3: Circuito de ligações do microcontrolador ESP8266 e os outros componentes - Protótipo Estação A e B

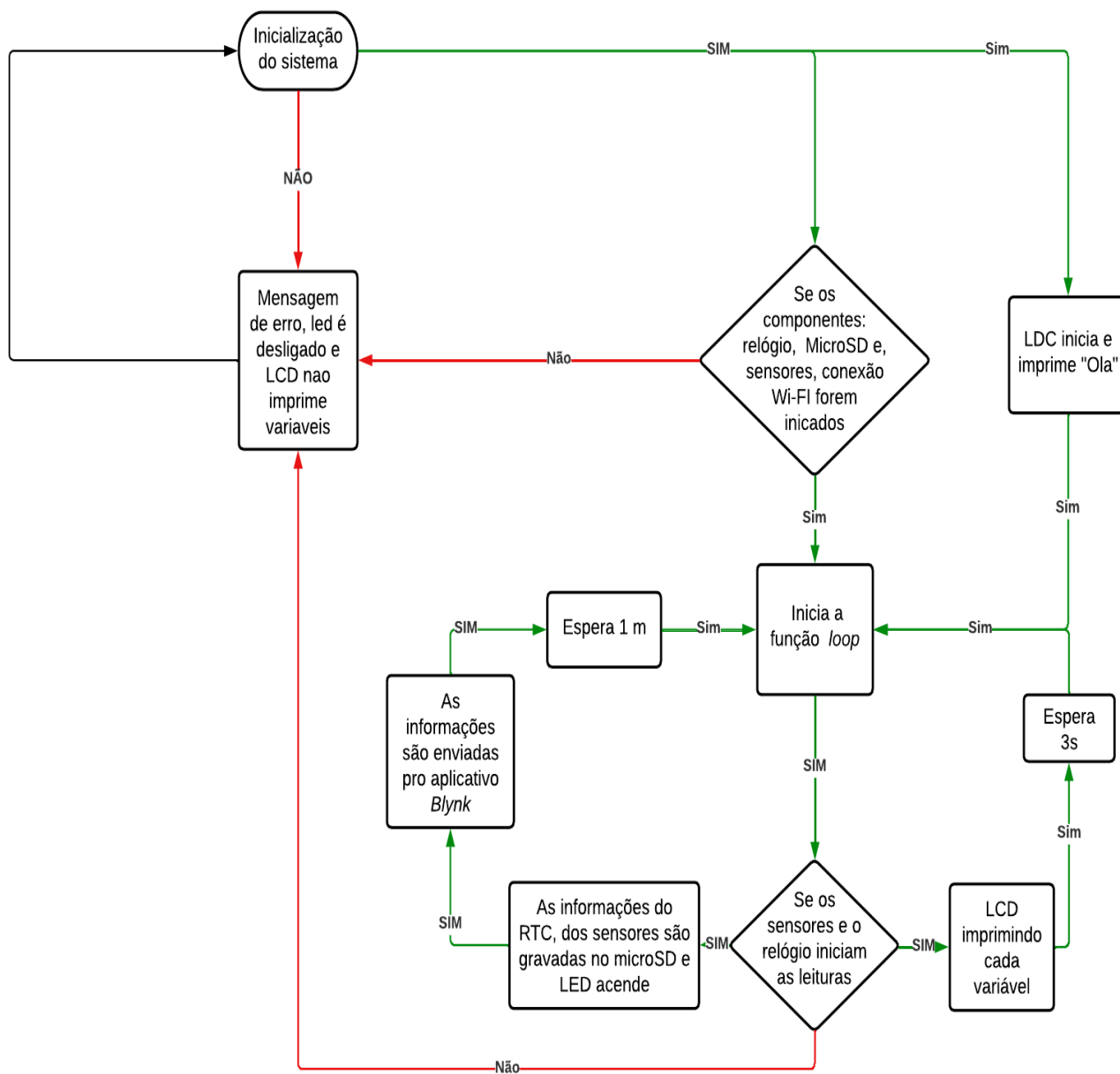


fritzing

Fonte: Autores (2024)

Algoritmo

O Algoritmo, código ou sketch inicia com a inclusão das bibliotecas de todos os dispositivos (sensores, RTC, Módulo leitor/gravador de micro SD, displays LCD's) através da diretiva `#include`; são incluídas tanto as bibliotecas internas quanto as externas. Também no início do código são atribuídos nomes a valores constantes através da diretiva `#define`. Além destas diretivas, foram declaradas variáveis. Na função void `setup ( )`, é inicializada a comunicação serial, dos dispositivos I2C, do sensor DHT22, do aplicativo Blynk, do sensor BMP180 – se a inicialização for bem sucedida é imprimido “Sensor de pressão iniciado”, caso contrário, imprime-se “Sensor de pressão falhou!” -, do módulo leitor/gravador se a inicialização for bem-sucedida é impresso na serial “SD card pronto pra uso” e é criado o arquivo onde serão gravadas as informações, caso contrário, é impresso na serial “Inicialização falhou”) (Figuras 4).

Figura 4: Algoritmo usado nos protótipos desenvolvidos no trabalho

Fonte: Autores (2024)

O display LCD liga e imprime “Ola” e o led azul da placa e o pino CS são definidos como saída. No final da função setup é impresso na serial “Setup encerrou!”. Após executadas as instruções na função setup, inicia-se a função loop. No início da função loop, são declaradas as variáveis locais cuja função leem os valores temperatura do ar, pressão atmosférica e umidade relativa do ar. Após, é iniciado os valores das variáveis citadas anteriormente. Além disso, o arquivo criado pelo módulo leitor/gravador de micro SD é aberto para que as informações de

ano, mês, dia, hora, minutos, segundos, temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica sejam impressas, salvas no cartão micro SD e mostradas em tempo real no aplicativo Blynk a cada um minuto. Caso todas essas etapas do programa sejam seguidas, o LED azul do microcontrolador fica ligado. Se não, o LED azul desliga e é impresso na serial “Não está ocorrendo a leitura”. Mesmo que as variáveis não estejam sendo gravadas no micro SD e não estejam aparecendo no Blynk devido a existência de algum erro, estas continuam sendo impressas no display LCD. O código usado para realizar as medições pode ser acessado no repositório (https://gitlab.com/lab.clim/codigo/-/blob/main/estacao.ino?ref_type=heads).

Plataforma Blynk

O Blynk foi utilizado como ferramenta de prototipação, em que o objetivo é aplicação da Internet das Coisas (Internet of Things – IoT). Através desta ferramenta, o usuário pode criar interfaces que seja possível controlar e monitorar os projetos por meio de smartphones com sistema Android ou iOS e pela web (Figura 5). Com o Blynk foi possível monitorar, em tempo real, por smartphones as informações das variáveis medidas pelos sensores de temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, entre outras coisas (Robotica, 2020). Dessa forma, para este projeto, foi desenvolvida uma interface a qual pode-se monitorar, em tempo real, as variáveis em análise.

Figura 5: Interface no aplicativo Blynk mobile pelo sistema Android para o monitoramento em tempo real da temperatura e umidade relativa do ar e pressão atmosférica



Fonte: Autores (2024)

A plataforma Blynk está disponível no aplicativo para download no sistema Android na Play Store, no sistema iOS Apple Store e na web pelo site <https://blynk.io/>. O sistema foi construído para leitura autônoma da temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, na qual se comunica pelo Protocolo de Controle de Transmissão – TCP e o Protocolo de Internet – IP por padrão porta 80. Os dados medidos nos protótipos das EMBC foram enviados e mantidos pelo servidor, sendo possível acessá-lo pelo aplicativo mobile e página web (Tristão, 2021).

Testes estatísticos

Para avaliação dos dados coletados dos protótipos das EMBC e os dados medidos na estação meteorológica de referência foi realizada com a aplicação do coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância (d). Além disso, foram calculados o Erro absoluto médio (MAE), Erro percentual médio absoluto (MAPE), Erro quadrático médio normalizado (NRMSE).

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida adimensional que quantifica o grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente pode assumir valores entre - 1 e 1, os quais os valores próximos a 1 indicam alta correlação linear positiva enquanto os valores próximos a - 1 indicam alta correlação linear negativa. Os valores próximos a zero indicam que entre as variáveis (X e Y , por exemplo) não há qualquer correlação linear. Os valores de X são representados por valores de referência (variável independente) e os valores de Y são representados por valores do modelo que está sendo testado (variável dependente). Dessa forma, o coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis X e Y é dado pela equação-1 (Oliveira, 2016):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (1)$$

onde:

O_i é o valor de observação

P_i é o valor de referência

$\bar{O}$ é a média dos valores de observação

$\bar{P}$ é a média dos valores de referência

O coeficiente de determinação (R^2) é obtido a partir da regressão linear, indicando a proporção de variação da variável Y que é explicada pela variável X ou o quanto da variação na variável Y (variável dependente) é explicada pela variável X (variável independente). Ou seja, a proporção do desvio na variável dependente que é previsível a partir da variável independente. O coeficiente de determinação pode assumir valores entre 0 e 1. Os valores mais próximos de 1 indicam que o modelo pode representar o conjunto de dados ou é adequado para descrever o fenômeno. Assim, R^2 pode ser expresso por meio da equação-2 (Oliveira, 2016):

$$R^2 = \frac{SQReg}{SQTotal} \quad (2)$$

em que:

SQReg e SQTotal são obtidos a partir da ANOVA da regressão linear simples.

O índice de concordância de Willmott (d) é uma medida descritiva responsável por indicar a exatidão comparada dos valores observados e dos valores de referência através do cálculo do afastamento dos valores de variável observada em relação aos valores da variável de referência (Andrade, 2018). Os valores ficam entre 0 e 1, sendo que os mais próximos de 1 indicam concordância perfeita enquanto os próximos de 0 indicam nenhuma concordância (equação-3):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(Y_i - \bar{X}) - (X_i - \bar{X})]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{X} + X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

em que:

X_i é a variável observada

Y_i valor da variável de referência

$\bar{X}$ média dos valores de X (padrão)

n é o número de pares de valores

A média do erro absoluto (MAE – mean absolute error) verifica o quanto o valor absoluto produzido pela referência, em média, se distancia do valor absoluto dos valores observados; ou seja, verifica o valor absoluto da diferença entre o valor de referência e o valor real. O MAE apresenta o erro nos valores observados (neste caso, dados coletados pelos protótipos das EMBC), auxiliando na compreensão e análise dos resultados. Assim, a média do erro absoluto iguais a 0, indicam ajuste perfeito do modelo, enquanto, os valores mais distantes de 0, indicam maiores erros, equação-5.

$$MAE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (5)$$

em que

O_i valores reais (dados coletados pelos sensores-teste)

P_i valores preditos (dados coletados da estação automática do INMET A601 – Seropédica)

n número de observações.

O erro médio absoluto percentual (MAPE – mean absolute percentage error) é o erro absoluto dividido pelo real, obtendo a distância em porcentagem do erro predito em relação ao realizado. Para que seja gerado um indicador único é calculado a média dos percentuais, pela equação-6.

$$MAPE = 100 \times \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{Obs_i - Model_i}{Obs_i} \right| \quad (6)$$

onde

Obs_i é o valor de observação (dados coletados dos sensores-teste);

$Model_i$ é o valor de previsão (dados coletados da estação do INMET).

O erro quadrático médio normalizado (NRMSE) consiste na fração do intervalo geral que é resolvido pelo modelo. É dado pela equação-7:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (7)$$

em que:

$\bar{O}$ é a média dos valores observados

RMSE consiste na quantificação do erro que existe entre dois conjuntos de dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Temperatura do ar

Os dados de temperatura do ar medidos em dezembro de 2023 pelos protótipos das EMBC e a estação de referência mostraram precisão e exatidão nas medições (Tabela 1). Para o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R^2) houve correlação entre os dados medidos (Figura 6).

Para os sensores de temperatura, o que obteve maior coeficiente de correlação de Pearson (r) e coeficiente de determinação (R^2), foi o sensor de BMP180 do protótipo Estação A, com $r = 0,98$ e $R^2 = 0,95$. Dessa forma, pela interpretação do (r) e (R^2), este sensor apresentou melhor precisão, devido ao $R^2 \geq 0,95$ e correlação linear positiva devido ao $r \geq 0,98$. Os menores erros

dentre os sensores de temperatura testados, foram obtidos também pelo sensor BMP180 do protótipo Estação B, em que o erro absoluto médio ($MAE \leq 0,96^\circ C$).

Isso quer dizer que a diferença na medição entre o sensor BMP180 do protótipo Estação B e o sensor de medição de temperatura da estação de referência é de 0,96. Para o mesmo sensor, observou-se erro quadrático médio normalizado $\leq 0,05$ ou 5%, indicando menor variância residual; ou seja, menor é a variância causada pelo erro. Esse desvio está dentro da faixa de erro encontrado pela maioria dos sensores de medição,

Dessa forma, os valores do sensor BMP180 do protótipo apresentaram maior adequação aos dados medidos pela estação meteorológica automática de referência, podendo esse ser usado para medir valores de temperatura do ar sem discrepância significativa.

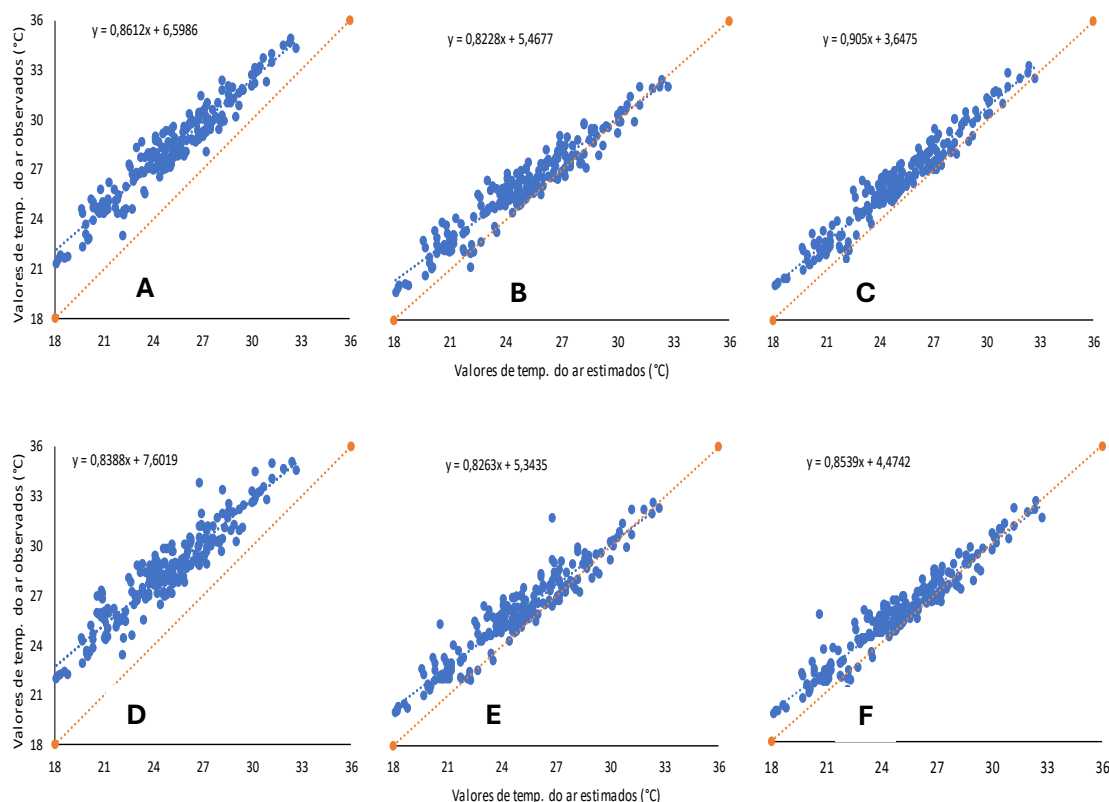
Para o sensor BMP180 também foi observado o melhor ajuste do índice de concordância de Wilmott ($d \geq 0,96$). Esse índice indica concordância perfeita e exata entre os valores dos sensores-teste e da estação de referência. Dessa forma, este sensor mostra-se capaz de representar o conjunto de dados medidos da estação de referência (Figura 5).

O sensor DHT22 do protótipo da estação A, para o elemento meteorológico temperatura, apresentou o segundo maior valor para r , R^2 e d , 0,96; 0,92 e 0,94, respectivamente. Alguns desses índices estatísticos foram iguais aos apresentados pelo sensor BMP180. Dessa forma, também apresentam precisão e exatidão em suas medições. A correlação linear positiva devido ao $r \geq 0,92$ e concordância entre os valores dos sensores-teste e os valores da estação de referência tendendo a perfeição pelo $d \geq 0,94$. O sensor DHT22 usado para medição de temperatura no sistema de baixo custo proposto por Da Mota et al. (2018) quando comparado com a estação meteorológica automática de referência (Hobo), apresentou $r = 0,87$ e $R^2 = 0,76$, enquanto que os valores obtidos pelos protótipos das EMBC foram $r = 0,96$ e $0,95$, $R^2 = 0,92$ e $0,90$, respectivamente para os protótipos A e B das EMBC. Os resultados apresentados por Sousa et al. (2015) usando o sensor DHT22 mostrou $R^2 = 0,88$, inferiores aos apresentados nesta pesquisa. Já Castelano (2021) obteve correlação de 0,953.

Tabela 1: Testes estatísticos aplicados aos sensores de temperatura do ar (°C) dos protótipos A e B das EMBC, com relação a estação meteorológica de referência

SENSORES	r	R^2	D	MAE °C	MAPE %	NRMSE %
ESTAÇÃO A						
Termistor	0,96	0,92	0,75	3,15	3,15	0,13
DHT22	0,96	0,92	0,94	1,17	1,07	0,06
BMP180	0,98	0,95	0,94	1,30	1,30	0,06
ESTAÇÃO B						
Termistor	0,94	0,89	0,69	3,60	3,60	0,15
DHT22	0,95	0,90	0,94	1,16	1,03	0,06
BMP180	0,96	0,93	0,96	0,96	0,85	0,05

Figura 6: Dispersão dos valores de temperatura do ar para e estação de referência (A601): A) Termistor x A601, B) DHT22 x A601, C) BMP180 x A601, para o protótipo Estação A. D) Termistor x A601, E) DHT22 x A601 e F) BMP180 x A601, para o protótipo Estação B.



Fonte: Autores (2024)

Apesar do r e R^2 serem maior no protótipo de baixo custo proposto por Da Mota et al. (2018), do que os propostos nesse estudo, o erro absoluto médio é maior (MAE) obtido por ele foi menor do que os observados nos sensores testados. Seu MAE = 0,23 °C, enquanto os obtidos em nosso estudo foi de MAE = 1,17 e 1,16 ° C, respectivamente para os protótipos A e B das EMBC. Isto pode ser explicado pela distância dos protótipos da estação meteorológica automática de referência. Visto que o sistema de baixo custo proposto por Da Mota et al. (2018) estava localizado a 3,5 m de distância da estação meteorológica automática de referência (Hobo), enquanto, o protótipo A e B testados estavam localizados a quase 1,5 Km da estação meteorológica automática de referência (EMA INMET A601).

Quando comparados a resultados que foram medidos a maiores distancias, como os resultados apresentados por Lima (2021), onde suas medições foram comparadas com uma estação meteorológica a 29 Km de distância. Neste caso, o erro percentual variou de 8,01% a 16,42%.

Sendo a EMA-A601 dentro do padrão recomendado pela OMM para as medições em estações meteorológicas, enquanto os protótipos A e B das EMBC em meio urbano, o que proporciona nas medições uma maior variabilidade.

Os erros absolutos médios de ambos os protótipos com DHT22 foram maiores do que 1, o que é devido as características dos locais e distância entre os locais de medição. No entanto, os protótipos com DHT22, se mostraram capazes de representar o conjunto de dados da estação de referência, com NRMSE = 0,06 foi igual para ambos os protótipos assim como o índice de concordância de Wilmott.

Dentre os sensores de temperatura testados o termistor NTC foi o que obteve o maior erro absoluto médio (MAE) para ambos os protótipos, sendo esse acima de 3,0 °C. Os dados de temperatura medidos pelos Termistores NTC superestimam os valores de temperatura da EMA-A601. Além disso, os menores valores do índice de concordância foram para o termistor NTC, indicando que a exatidão entre os valores observados e os valores de referência não é adequada. Dessa forma, os valores observados pelo termistor NTC não representam o conjunto de dados da estação de referência, pelo menos não nesse experimento!

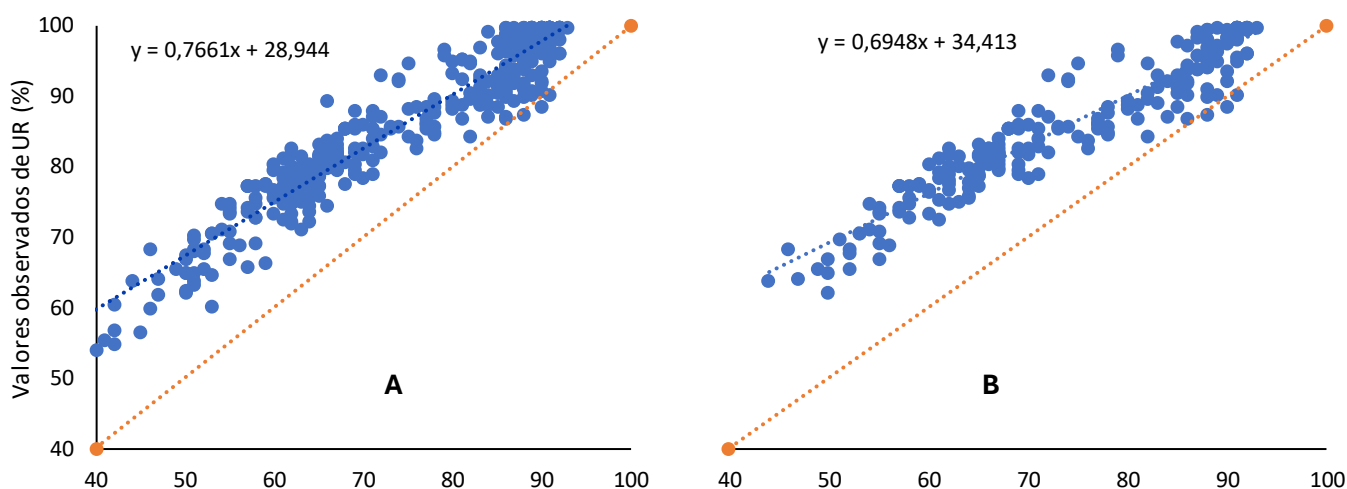
Umidade do ar

Os resultados apresentados pelo sensor DHT22 para avaliação da umidade relativa do ar foram iguais para os protótipos A e B (Tabela 2). Dessa forma, observou-se coeficiente de correlação de Pearson (r) = 0,95, coeficiente de determinação (R^2) = 0,90, índice de concordância de Wilmott (d) = 0,75, erro absoluto médio (MAE) = 11,86 %, erro médio absoluto percentual (MAPE) = 11,84 %, e o erro quadrático médio normalizado (NRMSE) = 0,17 ou 17 % (Figura 7). Os resultados apresentados por Lima (2021) mostraram erro percentual variou entre 6,67% e 29,31%, embora o sensor usado pelo autor para medir a umidade relativa do ar foi o DHT11.

Tabela 2: Testes estatísticos aplicados aos sensores de umidade do ar (°C) dos protótipos A e B das EMBC, com relação a estação meteorológica de referência

SENSORES	r	R^2	d	MAE %	MAPE %	NRMSE %
ESTAÇÃO A						
DHT22	0,95	0,90	0,75	11,86	11,84	0,17
ESTAÇÃO B						
DHT22	0,95	0,90	0,75	11,86	11,84	0,17

Figura 7: Dispersão para os valores de umidade relativa do ar do sensor DHT22 x para a estação de referência (A601) dos protótipos A (A) e B (B).



Fonte: Autores (2024)

Os resultados apresentados por Da Mota et al. (2018) utilizando o sensor DHT22, para medir umidade relativa do ar, apresentou resultados com $MAE = 11,56\%$, $r = 0,95$, $R^2 = 0,90$ e $d = 0,75$, resultados esses análogos ao encontrados em nossa pesquisa. Os resultados mostrados por Sousa et al. (2015) para a UR medidos com o sensor DHT22 mostrou $R^2 = 0,87$, inferiores aos apresentados nesta pesquisa.

Esses resultados podem indicar que a usabilidade do sensor DHT22 pode está restrito a essa precisão e exatidão. No entanto, os valores de correlação linear positiva apresentada por r e R^2 apresenta-se próximos de 1, o que indica que o modelo pode representar o conjunto de dados com precisão.

Embora, a exatidão precisa de um pequeno ajuste, um pouco maior do que 10%, para obter exatidão próximos de 1. Na Figura 6 é observado que os dados medidos com os sensores DHT22 foram superestimados, e que esse erro se trata de um erro sistemático, de fácil correção.

Pressão Atmosférica

Os resultados do sensor BMP180 para a avaliação da pressão atmosférica foram iguais para ambos os protótipos, assim como os obtidos pelos sensores DHT22 para a umidade do ar

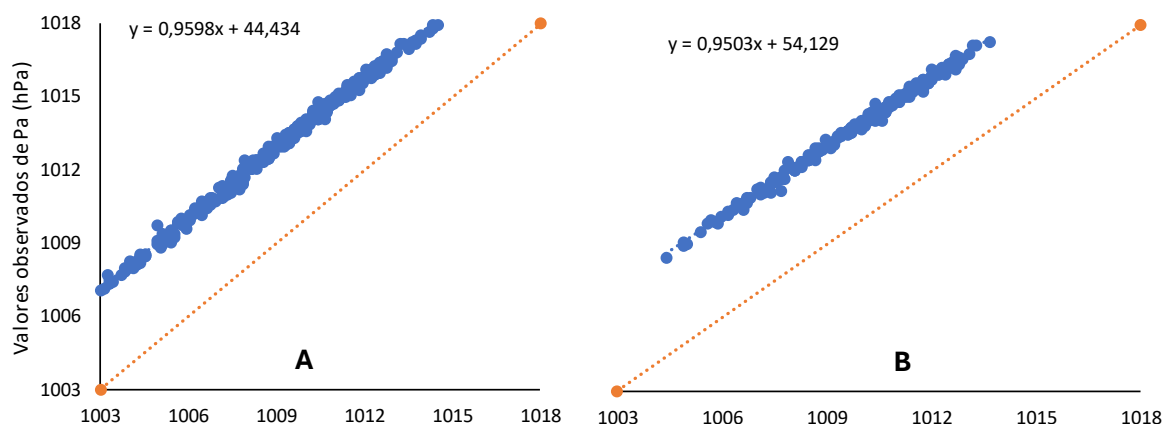
(Tabela 3). Ambos os protótipos mostraram precisão, com coeficiente de correlação de Pearson (r) = 0,98, coeficiente de determinação (R^2) = 0,99, mas não foi observada exatidão, com índice de concordância de Wilmott (d) = 0,51. O erro absoluto médio (MAE) = 3,95 hPa, erro médio absoluto percentual (MAPE) = 3,95 %, e o erro quadrático médio normalizado (NRMSE) = 0,004 ou 0,4 %. Erros até dentro da faixa de precisão dos sensores de medição (Figura 7).

Os resultados mostrados por Sousa et al. (2015) para pressão atmosférica mostrou R^2 = 0,99, análogo aos apresentados nesta pesquisa. O erro percentual na medição da pressão atmosférica apresentados por Lima (2021) variou entre 0,14% e 0,19%, o que pode estar associado a medição em locais diferentes.

Tabela 3: Testes estatísticos aplicados aos sensores de pressão atmosférica (hPa) dos protótipos A e B das EMBC, com relação a estação meteorológica de referência

SENSORES	r	R^2	D	MAE hPa	MAPE %	NRMSE %
ESTAÇÃO A						
BMP180	0,99	0,99	0,51	3,95	3,95	0,004
ESTAÇÃO B						
BMP180	0,99	0,99	0,51	3,95	3,95	0,004

Figura 7. Dispersão para os valores de pressão atmosférica do sensor BMP180x para a estação de referência (A601) dos protótipos A (A) e B (B).



Fonte: Autores (2024)

O valor do $r = 0,99$ indicando correlação linear positiva, $R^2 = 0,99$ indicando que os dados observados são adequados para representar os dados da estação de referência (Figura 7). Esses resultados mostram-se melhores do que foram obtidos para a umidade do ar, devido a variabilidade diária da pressão atmosférica. No entanto, sua confiabilidade pode ser comprometida pela sua exatidão, com índice de concordância de Wilmott = 0,51. É notório na Figura 6 que os valores de pressão atmosférica foram superestimados, apresentando erro sistemático, que pode ser em decorrência da distância entre os protótipos e da temperatura do ar entre estação de referência, sendo essa passiva de correção.

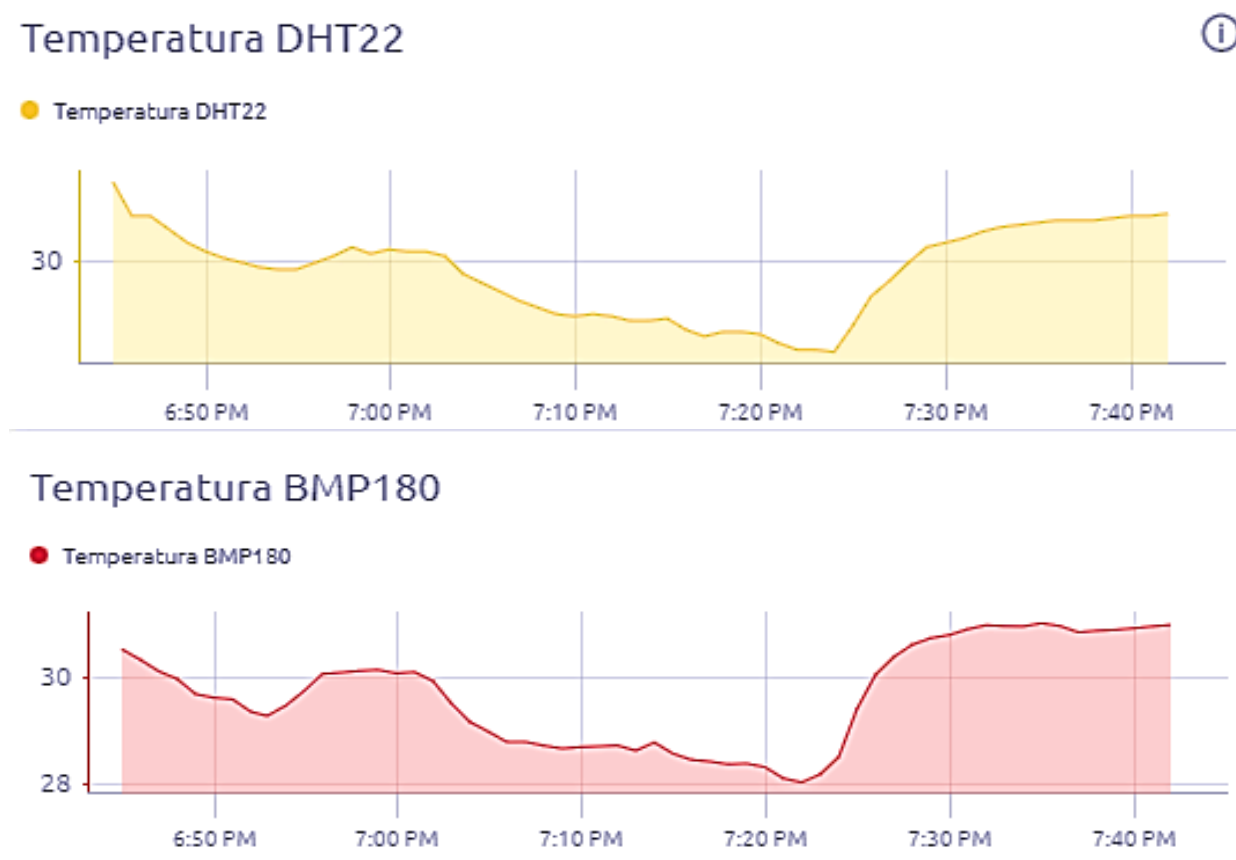
Monitoramento em tempo real

A integração do Wi-Fi ao microcontrolador ESP8266 permitiu a aplicação da ferramenta Internet das coisas (IoT). Assim, os protótipos A e B foram conectados a uma rede de internet via Wi-Fi, sendo possível, conectá-los a plataforma Blynk. Com o Blynk, os protótipos puderam ser acessados, monitorados e controlados de qualquer lugar do mundo. O ESP8266 e aplicativo Blynk trocam os dados por meio dos pinos digitais criados e implementados dentro do algoritmo. Por isso, os valores medidos pelos sensores puderam ser acompanhados em tempo real na plataforma Blynk tanto de dispositivos smartphones, quanto de websites (Figura 8 e 9). Os dados armazenados dentro da plataforma podem ser visualizados nos intervalos de 1 hora, 6 horas, 1 dia, 1 semana, 1 e 3 meses e por aplicação de filtro para um período personalizado.

Outra função que a plataforma Blynk possui é o download dos dados dos sensores os quais podem ser adquiridos por arquivos no formato CSV (Comma-Separated Values) e por e-mail periodicamente. Os arquivos em CSV gerados com os dados dos sensores podem ser utilizados em plataformas de Business Intelligence (BI) ou Inteligência de negócios (Werner e Esteves, 2020). O Business Intelligence (BI) é uma ferramenta que auxilia, por exemplo, no gerenciamento de riscos de maneira que haja redução nas incertezas que influenciam na tomada de decisão, principalmente na agricultura, já que uma atividade de alto risco e totalmente dependente dos elementos meteorológicos (Amini et al., 2021).

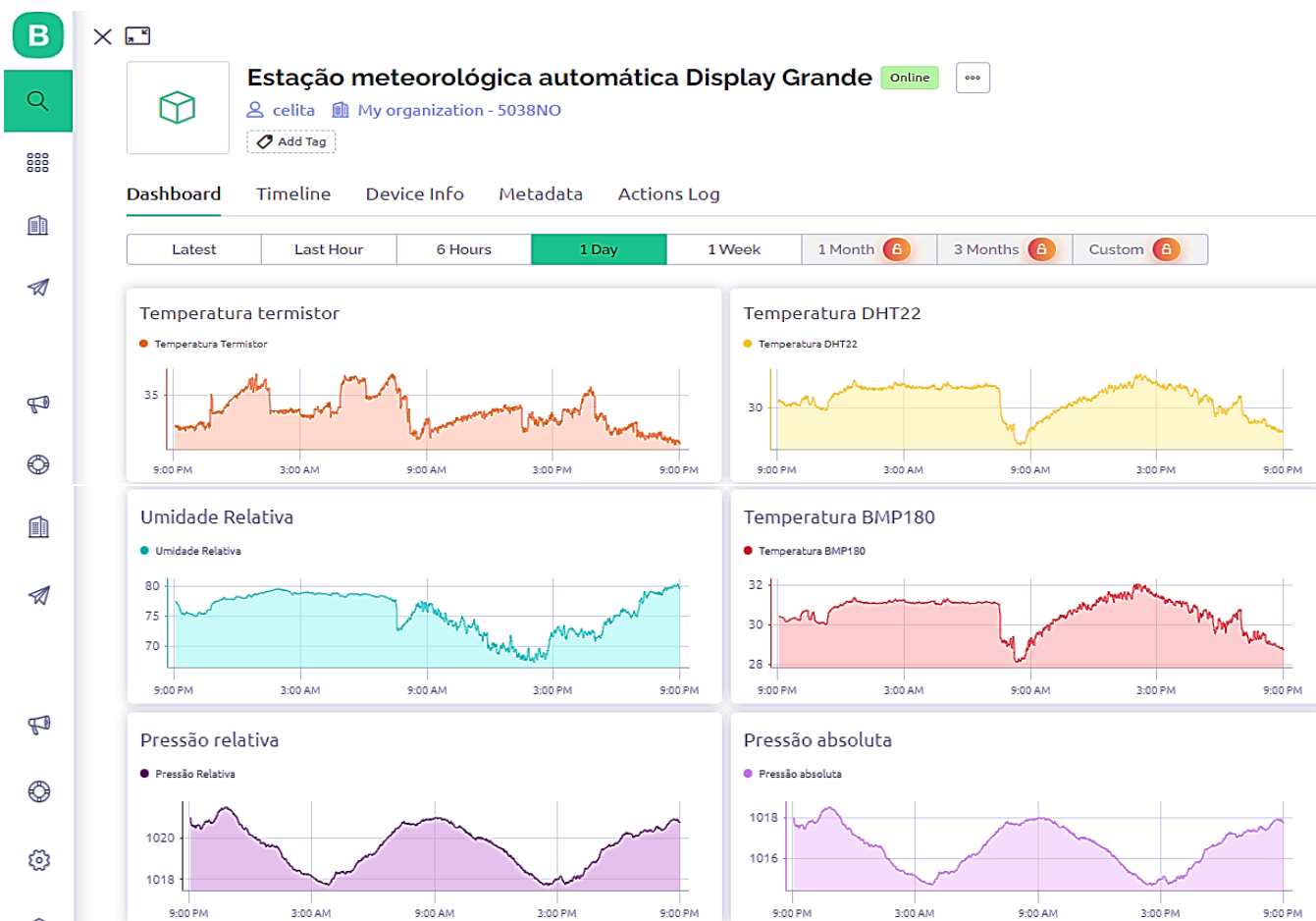
Além disso, esta funcionalidade permite a aquisição de dados sem que haja a necessidade de pessoas irem até o local para obtenção dos dados, diminuindo custos de produção devido a dispensa parcial ou total de recurso humano. Porém, na plataforma Blynk a visualização dos dados em tempo real a partir de 1 semana, exige que os usuários façam uma assinatura. Assim como, para adquirir os dados produzidos pelos sensores armazenados na plataforma via os arquivos CSV. Uma maneira de driblar esta barreira foi a criação de um datalogger com a utilização do módulo leitor/gravador microSD nos protótipos A e B (Figura 10) para o registro dos dados coletados com Real Time Clock (RTC), pelos sensores de temperatura e umidade relativa do ar e pressão atmosférica.

Figura 8: Variabilidade temporal dos sensores DHT22 e BMP180 para a medição de temperatura durante 1 hora de funcionamento



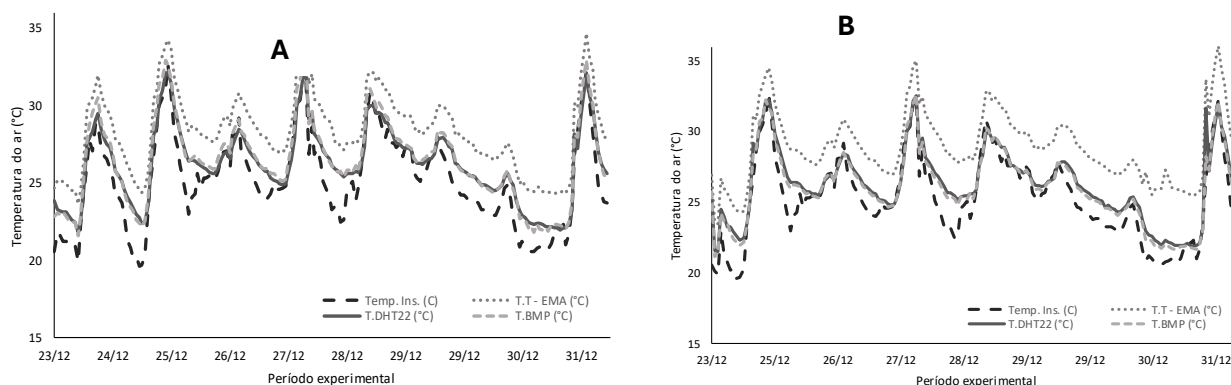
Fonte: Autores (2024)

Figura 9: Interface da plataforma Blynk no monitoramento dos elementos meteorológicos em tempo real da Estação B no período de 24 horas



Fonte: Autores (2024)

Figura10: Observação para a medição de temperatura do ar dos sensores dos protótipos A (A) e B (B) e a estação meteorológica A601.



Fonte: Autores (2024)

Custos dos protótipos das EMBC

O custo dos protótipos produzidos nesta pesquisa é muito inferior aos produtos comerciais das estações meteorológicas automáticas existentes no mercado. Fator esse que dificulta o acesso aos produtores e a toda sociedade. O custo foi um pouco maior do que R\$ 150,00 Reais, valor esse inferior a 10%, quando se compara as estações de menor custo que são vendidas, muitas delas sem certificação, ou até mesmo valor de 1% ou mesmos inferior as estações meteorológicas automáticas certificadas existente no mercado. O custo dos materiais em março de 2024, para construção do sistema autônomo de baixo custo para medição dos elementos meteorológicos estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4: custo dos materiais para construção do sistema autônomo de baixo custo para medição dos elementos meteorológicos

Componentes	Preço (R\$)
Placa NodeMCU ESP8266	29,99
Cabo micro USB para ESP8266	9,99
Módulo display OLED 0,96 I2C	27,00
Módulo Leitor/Gravador MicroSD	10,00
Módulo RTC DS3231	25,00
20x Cabo Jumper Fêmea x Fêmea 10 cm	5,99
20x Cabo Jumper Macho x Fêmea 10 cm	5,99
Sensor de Umidade e Temperatura DHT22	30,00
Sensor de Pressão Atmosférica BMP180	9,99
Termistor NTC 10K unid.	0,699
Total	154,65

Fonte: Autores (2024)

CONCLUSÕES

O desenvolver protótipos de um sistema autônomo de estações meteorológicas de baixo custo se mostrou eficaz e eficiente para a medição de elementos meteorológicos. O sensor BMP180, sensor-teste para coleta dos dados de temperatura do ar apresentou avaliação de desempenho satisfatório, mostrando exatidão e precisão nas medições. Sendo assim, o sensor

mais adequado para a representação dos dados de temperatura da estação automática usada como referência.

O sensor DHT22 usado como sensor-teste para coleta dos dados de temperatura do ar, apresentou-se preciso e exato, com um desempenho muito boa, sendo adequado para representar os dados de temperatura ar da estação automática de referência. O sensor também apresentou exatidão e precisão, mas sendo essa inferior ao sensor BMP180. O sensor Termistor NTC superestimou os dados coletados de temperatura do ar da estação automática de referência, apresentando-se preciso e não exato.

O DHT22 usado para representar os dados de umidade relativa do ar apresenta-se como preciso, mas não exato, assim como, o sensor BMP180 para a representação dos dados de pressão atmosférica tendo em vista que ambas as variáveis superestimam os dados da estação automática de referência. No entanto, os dados de umidade do ar apresentaram exatidão maior do que os de pressão atmosférica;

O aplicativo Blynk mostra-se adequado para o monitoramento em tempo real dos elementos meteorológicos pelos sensores vinculados ao ESP8266, porém na modalidade gratuita o monitoramento é limitado a uma semana, sendo necessário, que o usuário use a modalidade assinada para ter acesso a maiores períodos.

O custo dos protótipos torna-os acessíveis aos produtores tendo em vista que o valor de aquisição dos materiais para sua construção foi em torno de 1 a 10% dos valores de custos das estações automáticas existentes para a venda na internet.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A. et al., **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 22, No. 6, 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- AMINI, M. et al., **The implication of business intelligence in risk management: a case study in agricultural insurance**. Journal of Data, Information and Management, v. 3, n. 2, p. 155–166, 1 jun. 2021.
- ANDRADE, Danyllo Gomes Figueredo de. **Análise quantitativa entre métodos de estimativa da evapotranspiração horária integrada e diária no Brasil**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Brasil.
- ASSUNÇÃO, Anderson Parisotto. **Automação de aviário baseado em internet das coisas**. 2021.
- CASTELHANO, Francisco Jablinski. **Proposta de termohigromêtro de baixo custo para coleta de dados climáticos em campo**. Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium, Ituiutaba, v. 12, n. 1, p. 209-222, jan./jun. 2021.
- CARVALHO, Marcus Willame Lopes et al. **Comparação de dados meteorológicos e estimativa da radiação líquida e evapotranspiração de referência utilizando estações convencional e automática**. Agrometeoros, v. 27, n. 2, 2020.
- CRUZ, Maria do Céu Monteiro da et al. **Avaliação do potencial hídrico foliar, umidade do solo e temperatura do ar no período pré-florescimento dos citros**. Ciência e Agrotecnologia, v. 31, p. 1291-1296, 2007.
- DA MOTA, Wilson Nogueira et al. **SMUT-Sistema de baixo custo para aquisição de temperatura e umidade relativa do ar para manejo de irrigação**. Revista Engenharia na Agricultura, v. 26, n. 1, p. 89-99, 2018.

DE MORAES, Jessica B.; WANDERLEY, Henderson S.; DELGADO, Rafael C. **Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios.** Natural Hazards, v. 116, n. 2, p. 1463-1483, 2023.

DEVILLA, Ivano A. et al. **Variations of temperature and moisture content of grains stored in bins with aeration.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 8, p. 284-291, 2004.

FERNANDES, L. **Como fazer previsão do tempo com barômetro.** Revista Blog de Escalada, 12 fev. 2021. Disponível em: <<https://blogdescalada.com/como-fazer-previsao-do-tempo-com-barometro/>>. Acesso em: 4 mar. 2023

FILGUEIRA, Gabriel Allen et al. **Estação meteorológica automática de baixo custo.** 2022.

HIDALGO, Barbosa Rogério et al. Influence of abiotic factors infestation in Mahanarva fimbriolata (stål, 1854)(hemiptera: cercopidae) in sugar cane. Comunicata Scientiae, v. 5, 2014.

JORDÃO, Marcelo DL et al. **Estação automática de baixo custo para monitoramento de temperatura da compostagem.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 21, n. 11, p. 809-813, 2017.

LIMA, Ana Livia Oliveira. **Estação meteorológica de baixo custo utilizando arduino** / Ana Livia Oliveira Lima. – 2021. 62 f. : il. color. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2021.

OGATA, Katsuhiko; SOUZA, Heloisa Coimbra de; TANNURI, Eduardo Aoun. **Engenharia de controle moderno.** 1998.

OLIVEIRA, Elisângela Aparecida de. **Métodos para análise de concordância:** estudo de simulação e aplicação a dados de evapotranspiração. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PALMIERI, Anderson M. et al. Sistema automatizado para coleta de dados de umidade relativa e temperatura do ar. Engenharia Agrícola, v. 34, p. 636-648, 2014.

PEGORIM, J. **Alta pressão x baixa pressão.** Disponível em:
<<https://www.climatempo.com.br/noticia/2016/12/23/alta-pressao-x-baixa-pressao-5386>>.

Acesso em: 4 mar. 2023.

PEIXOTO, João Alvarez. **ESP8266 NodeMCU: do pisca led à internet das coisas.** Porto Alegre: Uergs, 2021.

PEREIRA, Antônio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo César. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas.** 2002.

PEREIRA, Renato Marques Sanches; WANDERLEY, Henderson Silva; DELGADO, Rafael Coll. **Homogeneous regions for rainfall distribution in the city of Rio de Janeiro associated with the risk of natural disasters.** Natural Hazards, p. 1-19, 2021.

REGUEIRA, Amanda de O.; WANDERLEY, Henderson Silva. **Changes in rainfall rates and increased number of extreme rainfall events in Rio de Janeiro city.** Natural Hazards, v. 114, n. 3, p. 3833-3847, 2022.

ROBOTICA, C. DA (ED.). **Kit IoT iniciante estação meteorológica com NodeMCU 8266.** Vitória da Conquista, BA.2020.

SANTOS, Bernardo Schmitz dos. **Estudo de um protótipo para controle e monitoramento em uma estufa de hortaliças baseado em internet das coisas e o microcontrolador ESP8266.** 2020.

TRISTÃO, Evandro Machado. **Desenvolvimento de uma estação meteorológica de baixo custo.** 2021.

WERNER, Lucas Araujo; ESTEVES, Matheus Marques. **Implementação de sistema de automação para hidroponia e envio de dados para a nuvem.**

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Instruments and Methods of Observation.** Volume III – Observing Systems. Genebra, Suíça. (2021).