



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS**

**CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL
TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL**

JAILSON RAMOS DA MATA

MONITORAMENTO URBANO COM SENSORES DE BAIXO CUSTO

MANAUS-AM

2023

JAILSON RAMOS DA MATA

MONITORAMENTO URBANO COM SENSORES DE BAIXO CUSTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora, como exigência para a obtenção de título de Tecnólogo do Curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM/CMDI.

Orientador(a): Prof. Dra. Laura Michela Batista Ribeiro.

Coorientador(a): MSc. Ranyelli Cunha de Figueiredo.

MANAUS-AM

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M425m Mata, Jailson Ramos da.
Monitoramento urbano com sensores de baixo custo / Jailson Ramos da Mata. — Manaus, 2023.
31f.: il. color.

Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial, 2023.

Orientador: Prof.^a Laura Michaela Batista Ribeiro, Dra.

Coorientador: Prof.^a Ranyelli Cunha de Figueiredo, Msc.

1. Clima. 2. Sensores. 3. Estação de baixo custo. I. Ribeiro, Laura Michaela Batista. II. Figueiredo, Ranyelli Cunha de. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. IV. Título.

CDD 621.381

Elaborada por Oziane Romualdo de Souza (CRB11/ nº 734)

JAILSON RAMOS DA MATA

MONITORAMENTO URBANO COM SENSORES DE BAIXO CUSTO

Monografia apresentada à banca examinadora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Eletrônica Industrial.

Aprovada em 23 de NOVEMBRO de 2023

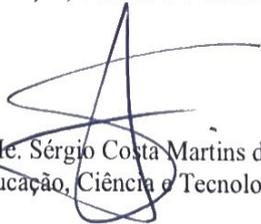
BANCA EXAMINADORA



Prof.ª. Dra Laura Michaela Batista Ribeiro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)



Prof. Me. Ricardo Brandão Sampaio
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)



Prof. Me. Sérgio Costa Martins de Alencar
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)

MANAUS-AM
2023

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, minha família em especial a minha mãe que sempre me apoiou e esteve ao meu lado, a minha orientadora Prof. Dra. Laura Michaela Batista Ribeiro, a minha coorientadora MSc. Ranyelli Cunha de Figueiredo, aos professores e colegas do Campus Manaus Distrito Industrial.

RESUMO

O monitoramento do clima é um parâmetro fundamental para diversas áreas do conhecimento, pois as mudanças climáticas afetam diretamente a qualidade de vida das pessoas. Neste trabalho foi utilizado sensores de baixo custo de temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica do ar, temperatura do ar e altitude para compará-los com sensores comerciais de temperatura e umidade relativa do ar (HOBO®, pendante); pressão atmosférica do ar (HOBO®, RX3000) e temperatura do ar (HOBO®, RX3000). A estação meteorológica de baixo custo ESP32-S foi instalada no Campus do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), a fim de compará-los com os dados da estação de 80m da rede de monitoramento do IETE, e assim fazer a verificação das medidas e atestar sua veracidade. Para avaliar o desempenho dos sensores da ESP32-S foi aplicada a estatística descritiva (MBE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2). A partir das análises dos dados obtidos foi possível observar que os valores de temperatura da estação de baixo custo subestimaram os máximos e os mínimos diários, tendo como MBE de $-0,59$ °C e apresentando um espalhamento de $0,59$ °C (RMSE). A umidade apresentou diferenças de 21,03 % e espalhamento de 19,47 % tanto na série temporal quanto no ciclo diário. Já os valores pressão subestimaram em todo o ciclo diário, a pressão atmosférica medida pelo BMP280, captura a variabilidade da pressão, porém superestimando a medida pelo HWS S-BPA-CM10, com MBE de 2,8 hPa e espalhamento de 2,8 hPa. Embora o erro observado pela umidade possui amplitude maior de 20%, a concordância entre os dados ainda é forte no valor de 0,9. A concordância da temperatura do ar e da pressão atmosférica apresentaram concordância de 1 e 0.99 respectivamente. Portanto o emprego de uma estação meteorológica de baixo custo pode ser considerado viável, tanto pelo custo, quanto por produzir resultados equivalentes aos dos sensores da estação meteorológica comercial.

Palavras-chave: Clima; Sensores; Estação de baixo custo.

ABSTRACT

Climate monitoring is a fundamental parameter for various fields of knowledge, as climate changes directly impact peoples quality of life. In this study, low cost sensors for temperature, relative air humidity, atmospheric air pressure, air temperature, and altitude were utilized. These measurements were compared with commercial sensors for temperature and relative air humidity (HOBO®, pendant); atmospheric air pressure (HOBO®, RX3000); and air temperature (HOBO®, RX3000). The low cost ESP32-S weather station was installed on the campus of the Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) to compare its data with the 80m station data from the IETE monitoring network, verifying the measurements and attesting to their accuracy. To assess the performance of ESP32-S sensors, descriptive statistics (MBE), Root Mean Square Error (RMSE), and the coefficient of determination (R^2) were applied. From the analysis of the obtained data, it was observed that the temperature values from the low cost station underestimated both daily maximum and minimum values, with an MBE of -0.59 °C and a spread of 0.59 °C (RMSE). Humidity showed differences of 21.03%, with a spread of 19.47% in both the temporal series and daily cycle. Pressure values consistently underestimated throughout the daily cycle, where atmospheric pressure measured by BMP280 captured the pressure variability but overestimated compared to the measurement by HWS S-BPA-CM10, with an MBE of 2.8 hPa and a spread of 2.8 hPa. Although the observed error for humidity has a larger amplitude of over 20%, the agreement between the data is still strong with a value of 0.9. The agreement for air temperature and atmospheric pressure showed values of 1 and 0.99, respectively. Therefore, the use of a low cost weather station can be considered viable, both in terms of cost and in producing results equivalent to those of commercial weather station sensors.

Keywords: Climate; Senors; Low Cost Station.

Lista de Figuras

Figura 1: Estações meteorológicas do Inmet no Amazonas. Estações convencionais e automáticas circuladas de vermelho.	9
Figura 2: Mapa da região urbana de Manaus com os pontos de monitoramento.	18
Figura 3: sensor de Temperatura e Umidade DKHT22 e U23 Pro v2.	20
Figura 4: Barômetro BMP280 e HWS S-BPA-CM10.	20
Figura 5: Diagrama de montagem da estação ESP32.	21
Figura 6: Case da Estação Esp32.	22
Figura 7: Instalação da estação de baixo custo ESP32 no dia 27/07/2023.	23
Figura 8: Vistoria diária, para reparos e acompanhamento dos dados.	23
Figura 9: Elevação para o cálculo da altitude da estação TU80.	24
Figura 10: Comparação da temperatura do ar °C, medidos pelo sensor DHT22 e o sensor U23 Pro v2. (a) Série temporal; (b) Ciclo diário.	27
Figura 11: Comparação da umidade relativa do ar %, medidos pelo sensor DHT22 e o sensor U23 Pro v2. (a) Série temporal; (b) Ciclo diário.	28
Figura 12: Comparação da Pressão Atmosférica, medidos pelo sensor BMP280 e o sensor HWS S-BPA-CM10. (a) Série temporal; (b) Ciclo diário.	29
Figura 13: Regressão linear simples entre as variáveis medidas pelos sensores de baixo custo acoplados a ESP32-S e os sensores comerciais HOBO. (a) Temperatura do ar ; (b) Umidade relativa do ar ; (c) Pressão atmosférica.	30

Lista de Tabelas

Tabela 1: Comparação entre a Esp8266, Esp32 e Arduino Uno	15
Tabela 2: Variáveis meteorológicas, suas unidades de medida, seus respectivos sensores, altura e armazenamento.	19
Tabela 3: Estatística descritiva do desempenho dos sensores da Esp32 em relação aos sensores HOBO.	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo Geral.....	11
2.2 Objetivos Específicos.....	11
2.3 Justificativa.....	11
2.4 Organização do trabalho.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Estações Meteorológicas.....	13
3.2 Esp32.....	13
3.3 Rtc Clock DS1307.....	15
3.4 Sensores.....	16
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
4.1 Área de estudo.....	18
4.2 Variáveis meteorológicas.....	18
4.3 Elaboração, montagem e instalação.....	21
4.4 Processamento dos dados.....	24
4.5 Obtenção da pressão reduzida ao nível médio do mar.....	24
4.6 Estatística.....	25
5. RESULTADOS.....	26
6. CONCLUSÕES.....	31
REFERÊNCIAS.....	32

1. INTRODUÇÃO

Os dados relacionados às condições meteorológicas desempenham um papel fundamental em diversas áreas, incluindo análise climática, previsões do tempo, emissão de alertas, atividades operacionais, investigações climáticas e avaliação dos efeitos das mudanças climáticas (Spiridonov, 2021). Esses dados são medidos por um conjunto de sensores, de maneira geral integrados à uma estação meteorológica fixa a no mínimo 1,5m de altura. Convencionalmente essas estações medem as seguintes variáveis, acumulado de precipitação pluvial, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar incidente e pressão atmosférica.

No Brasil o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, administra 750 estações distribuídas nos 6 distritos meteorológicos (INMET 2023), porém a região amazônica, possui grande extensão territorial e a instalação e manutenção desses sensores tornam-se altos, inviabilizando o monitoramento meteorológico em todos os municípios amazônicos. Essa carência dificulta o estudo de como a urbanização modifica os parâmetros climáticos na região. No estado do Amazonas, apenas 21 estações estão em funcionamento (Figura 1), em sua capital, Manaus há apenas uma estação meteorológica do INMET, logo para compreender como o clima urbano da cidade se comporta, em relação a heterogeneidade das características urbanas é necessário o aumento da malha de monitoramento da cidade de Manaus.

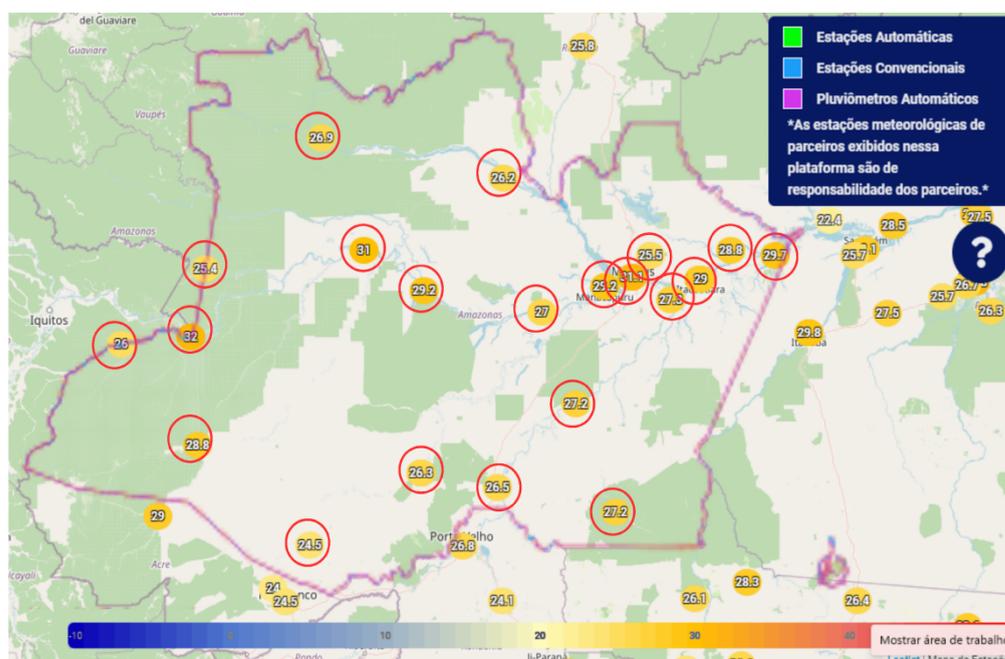


Figura 1: Estações meteorológicas do Inmet no Amazonas. Estações convencionais e automáticas circunscritas de vermelho.

Fonte: <https://mapas.inmet.gov.br/#>, Adaptado pelo autor.

Uma das alternativas para essa mitigação é o emprego de sensores de baixo custo acoplados em placas microprocessadoras que podem aumentar os pontos de monitoramento meteorológico. No entanto, as informações não são confiáveis porque não seguem um padrão regulamentado e aumentam a incerteza sobre a precisão das medições (Carranco 2017). Fazendo assim necessário avaliar a acurácia das medidas desses sensores com base em sensores de alta precisão.

2. OBJETIVOS

Neste capítulo serão abordados os objetivos, geral e específicos, a justificativa e como o trabalho foi organizado.

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de sensores de baixo custo, controlados por um microprocessador ESP32-S, para as medidas meteorológicas da temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica em uma área urbana de Manaus.

2.2 Objetivos Específicos

- Calibrar sensores na plataforma ESP32-S;
- Realizar coletas temporal de temperatura, umidade do ar e pressão atmosférica em uma urbana;
- Avaliar o desempenho dos sensores de baixo custo em relação aos sensores comerciais da HOBO®.

2.3 Justificativa

Diante das flutuações climáticas e de seus impactos no dia a dia da população, este estudo foi concebido com o propósito de viabilizar o monitoramento de um maior número de regiões, empregando sensores de custo acessíveis para essa especificidade. Embora o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mantenha diversas estações por todo o território brasileiro, sua quantidade revela-se pequena diante da vastidão do país; no Amazonas, por exemplo, existem apenas 21 estações operacionais. Conscientes da elevada despesa associada às estações convencionais, sugeriu-se a adoção de sensores de baixo custo. Entretanto, é importante calibrá-los e compará-los inicialmente com os sensores comerciais. Ao empregar métodos estatísticos, é possível avaliar a confiabilidade desses sensores.

2.4 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em 6 capítulos:

- No capítulo 1, é apresentada a introdução do trabalho.

- No capítulo 2, são apresentados os objetivos, a justificativa do trabalho e como o mesmo está organizado.
- No capítulo 3, são apresentados subsídios acadêmicos para embasamento da proposta adotada, descrevendo seus componentes à luz da literatura.
- No capítulo 4, são apresentados os materiais e métodos para o desenvolvimento do trabalho, sua área de estudo
- No capítulo 5, apresenta-se os resultados obtidos e discussões
- No capítulo 6, são apresentadas as conclusões e possíveis sugestões para futuros trabalhos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos utilizados neste trabalho, conceitos sobre as estações meteorológicas, da microcontroladora ESP32, do *RTC Clock*, dos sensores e suas aplicações.

3.1 Estações Meteorológicas

Uma estação meteorológica compreende um conjunto de instrumentos ou sensores designados para coleta de dados destinados à análise das condições ambientais. Estes dispositivos têm a capacidade de medir a temperatura ambiente, a velocidade e direção do vento, a umidade do ar, a radiação solar, a quantidade de chuva, a pressão atmosférica, e outras variáveis relacionadas ao clima (Cultivo Inteligente, 2023).

Como afirma o MUNDO CLIMA (2017), as estações meteorológicas convencionais exigem a presença de um observador diário para realizar a coleta de dados. É necessário organizar as informações e definir um banco de dados para armazenar as variáveis registradas. No entanto, é importante notar que os dados meteorológicos podem ser suscetíveis a falhas de observação, pois cada medida está sujeita à interpretação individual de cada observador.

3.2 Esp32

A ESP32 constitui uma linha de microcontroladores com custo reduzido e eficiência energética, desenvolvida pela ESPRESSIF. Essa série engloba uma versão *System-on-Chip* (SoC), integrando microcontrolador, módulos de WiFi e *Bluetooth*. Os dispositivos da linha ESP32 operam por meio de um microprocessador Tensilica Xtensa LX6, com uma frequência de 2.4 GHz. Disponíveis em variações dual-core e single-core, esses microcontroladores apresentam uma antena integrada do tipo balun, amplificador de potência, receptor amplificador de baixo ruído, filtros e funcionalidades avançadas de gerenciamento de energia para os módulos (ESP32, 2020).

A ESP32, é um microcontrolador conhecido por sua eficiência. Com desempenho elevado, consumo de energia reduzido e suporte às tecnologias sem fio Wi-Fi padrão 802.11 b/g/n e Bluetooth, o dispositivo oferece uma gama de recursos. O chip em si abriga 4 MB de memória flash, uma CPU dual-core, 448 *Kbytes* de memória ROM e 520 *Kbytes* de memória RAM. Contando com 36 portas, das quais 18 podem ser empregadas como conversores analógico-digitais de 12 *bits*, a ESP32 opera a uma tensão de 3.3V (SYSTEMS, 2019).

A ESP32 é bem versátil, sendo composta pelos seguintes recursos periféricos:

- 18 canais conversor analógico-digital (ADC)

- 10 GPIOs (*General Purpose Input/Output*) de detecção capacitiva)
- 3 interfaces UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*)
- 3 interfaces SPI (*Serial Protocol Interface*)
- 2 interfaces I2C (*Inter-Integrated Circuit*)
- 16 canais de saída PWM (*Pulse Width Modulation*)
- 2 conversores digital para analógico (DAC)
- 2 interfaces I2S (*Inter-IC Sound Bus*)

Escolher um dispositivo para montagem de um projeto depende das necessidades específicas do que se deseja aplicar, assim caso o projeto precise de conectividade com Wi-Fi e Bluetooth de forma nativa, a ESP32 pode ser uma escolha mais adequada considerando o tipo de comunicação requerido.

O ESP8266 oferece um equilíbrio intermediário em termos de recursos e preço. A seguir é possível observar as vantagens e desvantagens da ESP32, ESP8266 e Arduino UNO e outros detalhes mais específicos na Tabela 1.

Arquitetura e Desempenho:

- ESP32: Dual-core Tensilica LX6, alto desempenho.
- ESP8266: Single-core Tensilica LX106, desempenho intermediário.
- Arduino Uno: Microcontrolador ATmega328P, desempenho básico.

Conectividade:

- ESP32 e ESP8266: Wi-Fi embutido, ideal para IoT.
- Arduino Uno: Necessita de módulo externo para Wi-Fi.

Bluetooth:

- ESP32: Suporte nativo para *Bluetooth Classic* e BLE.
- ESP8266 e Arduino Uno: Sem suporte nativo para Bluetooth.

GPIO e Periféricos:

- ESP32 e ESP8266: Abundância de pinos GPIO e suporte a diversos protocolos.
- Arduino Uno: GPIOs e suporte a protocolos, geralmente em menor quantidade.

Memória:

- ESP32: Mais RAM e *Flash*.
- ESP8266 e Arduino Uno: Menos recursos de memória.

Preço:

- ESP32 e ESP8266: Geralmente mais acessíveis que o Arduino Uno.
- Arduino Uno: Pode ser mais caro, especialmente com expansões.

IDE e Programação:

- ESP32 e ESP8266: Programáveis na IDE do Arduino.
- Arduino Uno: IDE do Arduino, amigável para iniciantes.

Consumo de Energia:

- ESP32 e ESP8266: Modos de baixo consumo, adequados para projetos com bateria.
- Arduino Uno: Consumo de energia geralmente mais alto.

Tabela 1: Comparação entre a Esp8266, ESP32 e Arduino UNO.

	ESP8266	ESP32	Arduino UNO
Valor	R\$ 66,00	R\$ 89,00	R\$ 62,50
Arquitetura	32 bits	32 bits	8 bits
Clock	80 - 160 MHz	160 - 240 MHz	16 MHz
Bluetooth	Não	Bluetooth Low Energy	Não
Wifi	Sim	Sim	Não
RAM	160 KB	520 KB	2 KB
FLASH	16 MB	16 MB	32 MB
GPIO	13	34	14
DAC	0	2	0
ADC	1	18	6
Interfaces	SPI, I2C, UART e I2S	SPI, I2C, UART, I2S e CAN	SPI, I2C e UART

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Rtc Clock DS1307

A sigla RTC designa Relógio de Tempo Real, representando um dispositivo capaz de realizar o controle temporal com precisão. Este módulo dispõe de 56 *bytes* de memória não volátil destinados a aplicações, possibilitando o armazenamento abrangente e a exibição de

informações de dados, como dia da semana, dia do mês, mês, ano, além das funções de horas, minutos e segundos. Além disso, oferece suporte aos formatos de 12 ou 24 horas, ajustes automáticos para lidar com meses que possuíam menos de 31 dias e anos bissextos (MAKERHERO,2019).

Possui uma entrada destinada a bateria de *backup*, garantindo a preservação das informações de cronometragem. Armazena dados de segundos, minutos, horas, dias, meses e anos. Incorpora dois alarmes programáveis que podem ser usados para gerenciamento temporário em sistemas microcontrolados. A comunicação de dados, tanto para leitura quanto escrita, é realizada por meio da porta de comunicação I2C (MAXIM, 2015).

O *RTC Clock* foi conectado aos pinos padrão ESP32 I2C, que correspondem ao GPIO21 para SDA (*Serial Data*) e ao GPIO22 para SCL (*Serial Clock*). A linha de comunicação SDA é encarregada da transmissão de dados, enquanto o SCL é responsável pelo sinal de *clock* no barramento.

3.4 Sensores

Sensores são dispositivos que recebem e reagem a sinais ou estímulos, sendo empregados para medir diversas grandezas físicas, como temperatura e pressão. Eles convertem os dados coletados em sinais eletrônicos. Atualmente, esses dispositivos desempenham papéis essenciais em uma variedade de setores, encontrando aplicação em ambientes industriais, comerciais e até mesmo em contextos hospitalares (SOBRINHO, 2008).

Sensores de temperatura são dispositivos de medição que identificam a temperatura com base em características físicas específicas dos equipamentos, como resistência elétrica, campo eletromagnético ou radiação térmica. O funcionamento desses sensores varia de acordo com a propriedade física na qual são fundamentados. Dentre os diversos tipos de sensores de temperatura, destacam-se termopares, detectores de temperatura de resistência, termistores, interruptores bimetalicos e sensores de temperatura infravermelho (SIGIMA SESNOR, 2023).

O sensor de temperatura e umidade empregado neste estudo é o Termohigrômetro DHT22. Esse dispositivo opera com base em um sensor capacitivo de umidade e um termistor para medir as condições do ar circundante. Ele transmite as informações para um microcontrolador de 8 *bits*, que responde com um sinal digital para outro microcontrolador, sendo neste caso a ESP32. O DHT22 opera em uma faixa de tensão entre 3,3 V e 5 V, com um consumo médio de aproximadamente 1,3 mA.

“Sensores de pressão são equipamentos que têm por finalidade medir a pressão de um determinado local. A pressão é definida como a força aplicada por um líquido ou gás em uma superfície” (SIGMA SENSOR, 2023).

Geralmente, os sensores são categorizados com base na técnica empregada para converter a pressão mecânica em um sinal eletrônico proporcional. Todas as tecnologias têm um objetivo comum: transformar a pressão aplicada ao sensor em um sinal eletrônico proporcional a essa pressão. A pressão pode ser medida por meio de diferentes métodos, tais como Capacitância Variável (Capacitivos), Piezo-resistivo (*Strain Gage*), Potenciométrico, Piezo-elétrico, Relutância Variável, Ressonante, e Ótico (INSTRUMATIC, 2012)

O sensor de pressão utilizado neste projeto foi o barômetro BMP280, conectado aos mesmos pinos de comunicação padrão I2C da ESP32 utilizados pelo RTC Clock. Esses pinos são o GPIO21 (SDA) e o GPIO22 (SCL), em que o SDA (Serial Data) é responsável pela transmissão de dados, enquanto o SCL (*Serial Clock*) supervisiona o sinal de *clock* no barramento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas as metodologias de como este trabalho foi desenvolvido, tais como a área de estudo, as variáveis meteorológicas analisadas, elaboração do protótipo, processamento de dados e as estatísticas utilizadas.

4.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido no campus II do Instituto Nacional de pesquisa da Amazônia (INPA) ($3^{\circ}05'35.68''\text{S}$ $59^{\circ}59'59.62''\text{O}$), na área urbanizada do município de Manaus, correspondente a 3,74% de sua extensão territorial total (11.401,092 km²), aproximadamente 427 km² (EMBRAPA, 2017). Essa área urbana engloba diversas paisagens com diferentes densidades de habitantes, ao qual foi instalado no abrigo meteorológico a estação da ESP32-S, durante o período de 27 de julho de 2023 ao dia 04 de agosto de 2023. Também foram utilizados dados meteorológicos da estação de 80m da rede de monitoramento IETÉ, para a avaliação dos dados coletados pela ESP32-S. A localização das estações está retratada no mapa a seguir.

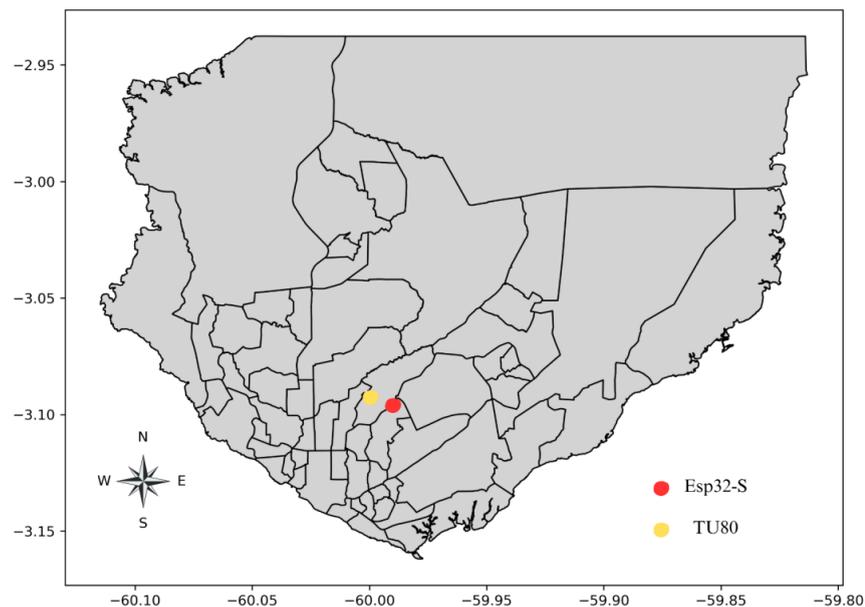


Figura 2: Mapa da região urbana de Manaus com os pontos de monitoramento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas medidas estão dispostas na Tabela 2, com seus respectivos sensores.

Tabela 2: Variáveis meteorológicas, suas unidades de medida, seus respectivos sensores, altura e armazenamento.

Variável	Unidade	Sensor	Altura	Armazenamento	Medida
Temperatura e umidade relativa do ar	°C; %	DHT22	1.5m	Esp32, microSD	1 min
Pressão Atmosférica do ar; Temperatura do ar; Altitude.	hPa; °C; m	BMP280	1.5m	Esp32, microSD	1 min
Temperatura e umidade relativa do ar	°C; %	U23 Pro v2	1.5m	HOBO®, pendante	5 min
Pressão Atmosférica do ar	hPa	HWS S-BPA-CM10	80m	HOBO®, RX3000	5 min
Temperatura do ar	°C	S-THC-M002	80m	HOBO®, RX3000	5 min

Fonte: Elaborada pelo autor.

O termohigrômetro DHT22 (Figura 3), integra um sensor de temperatura do ar e umidade, fornecendo instantaneamente as condições de temperatura (por um termistor) e umidade do ar (por sensor capacitivo). Esse sensor é amplamente utilizado para fins de observação meteorológicas, pois possui a capacidade de medir temperaturas de -40 °C a 80 °C e umidade na faixa de 0 a 100%. Sua faixa de precisão para temperatura é de 0,1 graus, e para umidade é de 0,1%. O termohigrômetro U23 Pro v2 (Figura 3), possui resolução de 0,02 °C para temperatura e para a umidade relativa, medidas entre 0 a 100%, com resolução de 2,5% entre 10% e 90% e de 5% entre 90% a 100% e possui vasto emprego para monitoramento meteorológico. Os termohigrômetros DHT22 e U23 Pro v2, foram dispostos no mesmo abrigo meteorológico, em busca de medirem as condições de temperatura e umidade relativa nas

mesmas condições de tempo. O DHT22 realizou as medidas em frequência de 1 min e o U23 Pro v2 em 5 min.



Figura 3: Sensor de Temperatura e Umidade DHT22 e U23 Pro v2.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O sensor BMP280 possui como principal variável de medida a pressão atmosférica, porém também mede a altitude e a temperatura, as medidas de pressão são realizadas em um range de 300 a 1100 hPa, temperatura de 0°C a 50°C, isso possibilita que ajustes sejam realizados na pressão atmosférica para ao nível médio do mar, como descrito na seção 3.4. O sensor HWS S-BPA-CM10 desempenha a função de fornecer a medição da pressão barométrica média durante cada intervalo de registro de dados. Ele opera dentro da ampla faixa de 660 mb a 1070 mb. Este sensor possui uma faixa de temperatura de operação que varia de -40°C a 70°C, com capacidade de sobrevivência estendida suportando condições de -20°C a 70°C. O sensor BMP280 coletou as variáveis em frequência de 1 min e ficou disposto no case, juntamente com o sistema da ESP32-S, o HWS S-BPA-CM10 estava a 80m na torre meteorológica TU80 da rede de monitoramento IETÉ.



Figura 4: Barômetro BMP280 e HWS S-BPA-CM10.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Elaboração, montagem e instalação

A estação ESP32-S, foi composta pelo diagrama descrito na Figura 5. A microprocessadora Node-MCU ESP32-S, realiza o papel de controle e automatização dos processos para a coleta de dados da seguinte forma. O módulo RTC DS1307, é o relógio que organiza tanto o horário da coleta dos dados, quanto o armazenamento dos mesmos no microSD, sendo essa coleta realizada a cada 1 min (60000 milissegundos). A alimentação do sistema foi realizada por uma bateria recarregável de 4,2 V, ao qual possui duração de consumo de 4 dias no sistema, sendo assim, necessário sua substituição após o decaimento da bateria.

Para a montagem do sistema, utilizamos uma *proto-board* e jumpers macho-fêmea e macho-macho. O case de montagem está retratado na Figura 6. A programação foi realizada pela plataforma Arduino IDE.

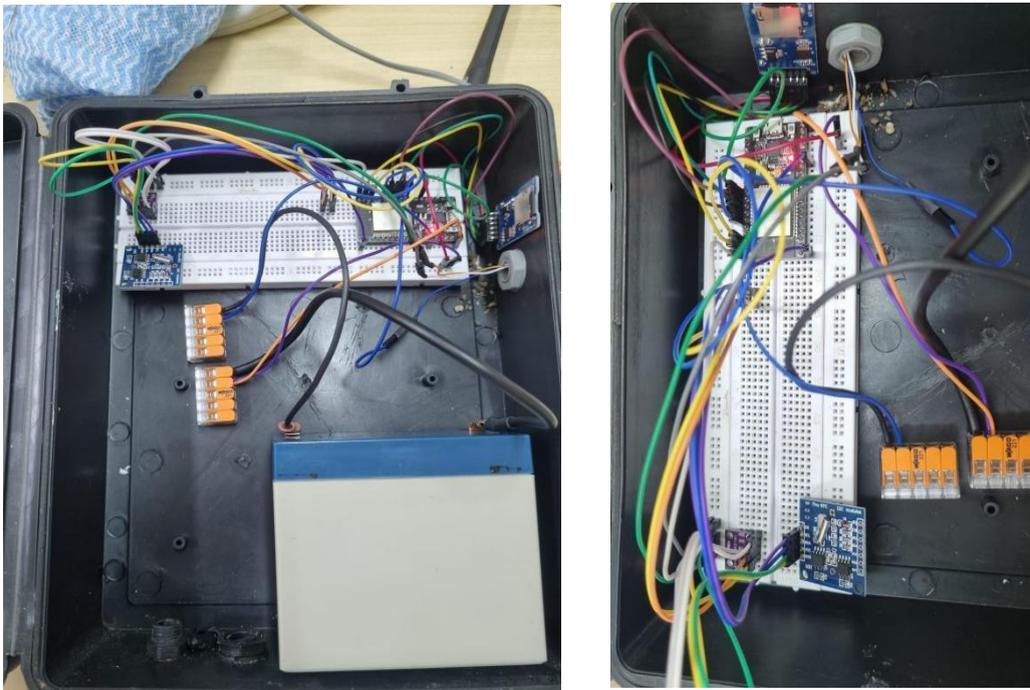


Figura 5: Case da Estação Esp32.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base na representação da Figura 5, é possível examinar as interconexões dos sensores em seus respectivos pinos. Cada dispositivo estabelece comunicação com o microcontrolador por meio de um protocolo específico. Por exemplo, o sensor de temperatura e umidade, DHT22, está conectado ao pino GPIO4, sendo sensível a pulsos elétricos.

O barômetro BMP280 está vinculado aos mesmos pinos de comunicação padrão I2C da ESP32, utilizados pelo *RTC Clock*. Esses pinos são o GPIO21 (SDA) e o GPIO22 (SCL), em que o SDA (Serial Data) é responsável pela transmissão de dados, enquanto o SCL (Serial Clock) supervisiona o sinal de clock no barramento. No caso do RTC DS1307, foi empregado para sincronizar o horário da ESP32. Ao conectar o microcontrolador a um RTC Clock e a um módulo microSD, obtém-se um registrador de dados, ou seja, um datalogger.

O módulo adaptador de cartão microSD utiliza o protocolo de comunicação SPI, sendo conectado aos pinos MISO, MOSI, SCK e CS. Na ESP32, esses pinos estão designados como GPIO19 (MISO), GPIO23 (MOSI), GPIO18 (CSK) e GPIO5 (CS). O módulo microSD foi escolhido devido à limitação da ESP32, que possui apenas 4 MB de memória, possibilitando o armazenamento de uma maior quantidade de dados.

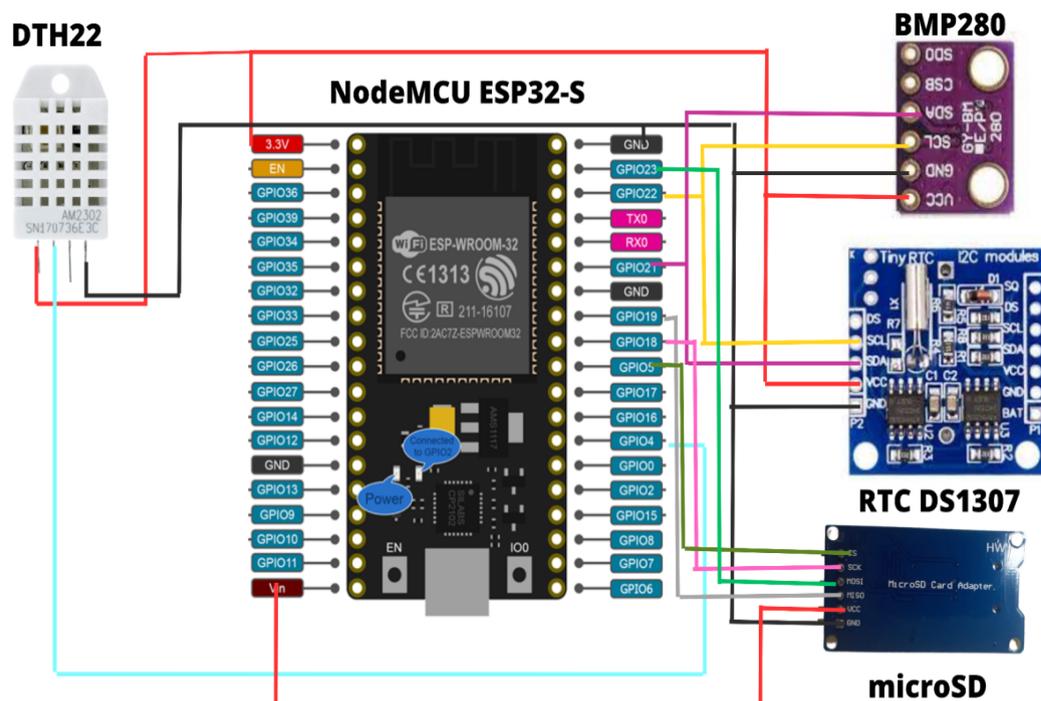


Figura 6: Diagrama de montagem da estação ESP32.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema foi instalado no abrigo meteorológico (Figura 7) em frente ao prédio do LBA, no Campus II do Inpa, no dia 27/07/2023 e foi retirado no dia 04/08/2023. Foram feitas manutenções diárias na estação, para que não ocorresse perda de dados e decaimento da bateria (Figura 7).



Figura 7: Instalação da estação de baixo custo ESP32 no dia 27/07/2023.

Fonte: Elaborada pelo autor.

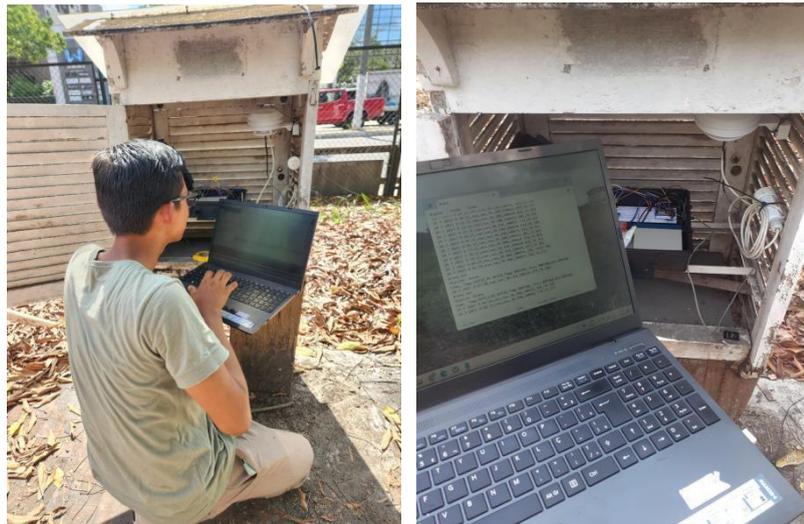


Figura 8: Vistoria diária, para reparos e acompanhamento dos dados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 Processamento dos dados

Os dados foram processados em *Python* utilizando o *Spyder*. Os dados provenientes da ESP32-S, estavam em frequência de 1 min, logo foram realizadas médias de 5 min, para assim compará-las aos dados medidos pelos sensores HOBO.

4.5 Obtenção da pressão reduzida ao nível médio do mar

Diferentemente dos dados de temperatura e umidade relativa do ar, a pressão atmosférica não possuiu repetição de sensor ao nível da estação da ESP32-S. Logo a estação mais próxima que havia um barômetro era a TU80, da rede IETÉ de monitoramento. A pressão atmosférica decresce ao aumento da altitude, e para fins meteorológicos de comparação, foi necessário reduzir ao nível médio do mar, a pressão medida pelo sensor BMP280 localizado no INPA Campus II e HWS S-BPA-CM10 na torre meteorológica TU80, para assim compará-los.

O ajuste foi realizado, por meio da equação 1, que é uma simplificação da equação barométrica, também conhecida como a fórmula do barômetro.

$$P_{mar} = P_{atual} \left(1 - \left(\frac{L \cdot h}{T} \right) \right)^{\frac{g \cdot M}{R \cdot L}} \quad (1)$$

Em que P_{mar} é a pressão atmosférica reduzida ao nível médio do mar em hPa, P_{atual} é a pressão medida pelo barômetro em hPa, L é o lapse rate seco em K/m, T a temperatura absoluta em Kelvin, h a altitude em metros, g a aceleração da gravidade em m/s^2 , M a massa molar média do ar em kg/mol e R a constante do gás para ar seco em J/(kg·K).

O sensor HWS S-BPA-CM10 não possui a medida da temperatura e de altitude, então foi utilizada a temperatura do sensor ao nível da estação TU80, assim como a altitude da estação, por meio da ferramenta Google Earth Pro (Figura 9). TU80, encontra-se acima do prédio de 80m do condomínio Coral Gables, portanto, a altitude final é igual a 121 m, resultante da soma da elevação de 39m, da altura do prédio (80 m) e do comprimento da estação de 2 m.



Figura 9: Elevação para o cálculo da altitude da estação TU80.

Fonte: Google Earth Pro.

4.6 Estatística

A fim de avaliar o desempenho dos sensores de baixo custo foi aplicado as estatísticas RMSE (Equação 2) (Raiz do Erro Quadrático Médio), MBE (Equação 3) e o R^2 (coeficiente de determinação) (Equação 4). As medidas realizadas pelos sensores de baixo custo estão descritas como ESP32 e as medidas de sensores comerciais como HOBO.

Nesse contexto, o RMSE (Equação 2) consiste em calcular a raiz quadrada da soma da diferença das variáveis meteorológicas, temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica ao nível do mar, medidas entre os sensores ESP32 e os sensores HOBO.

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\Sigma(Esp32-HOBO)^2}{n}\right)} \quad (2)$$

O MBE (Equação 3) descreve o erro médio entre as medidas dos sensores da ESP32 e os da HOBO, por meio do somatório da diferença entre as medidas das variáveis meteorológicas em razão do tamanho amostral.

$$MBE = \left(\frac{\Sigma(Esp32-HOBO)}{n}\right) \quad (3)$$

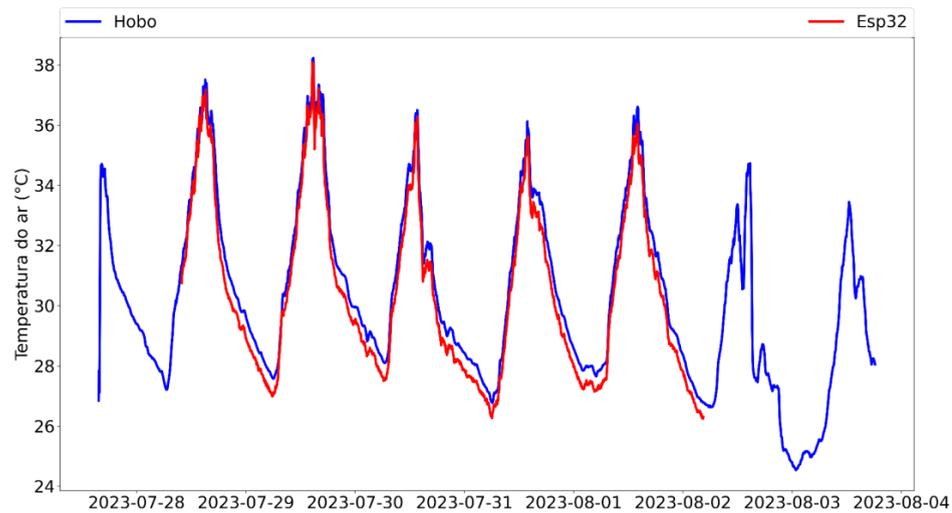
O coeficiente de determinação, R^2 (Equação 4), é um artifício estatístico utilizado para avaliar o quão bem um modelo de regressão se ajusta aos dados observados. Logo, representa o quão representativo as medidas das variáveis meteorológicas medidas pelos sensores ESP32 em relação aos medidos pelos sensores HOBO. Em outras palavras, o R^2 revela a fração da variabilidade presente na variável dependente que pode ser atribuída ao modelo de regressão.

$$R^2 = \frac{\Sigma[(HOBO-HOBO)(Esp32-Esp32)]^2}{\Sigma(HOBO-HOBO)^2 \Sigma(Esp32-Esp32)^2} \quad (4)$$

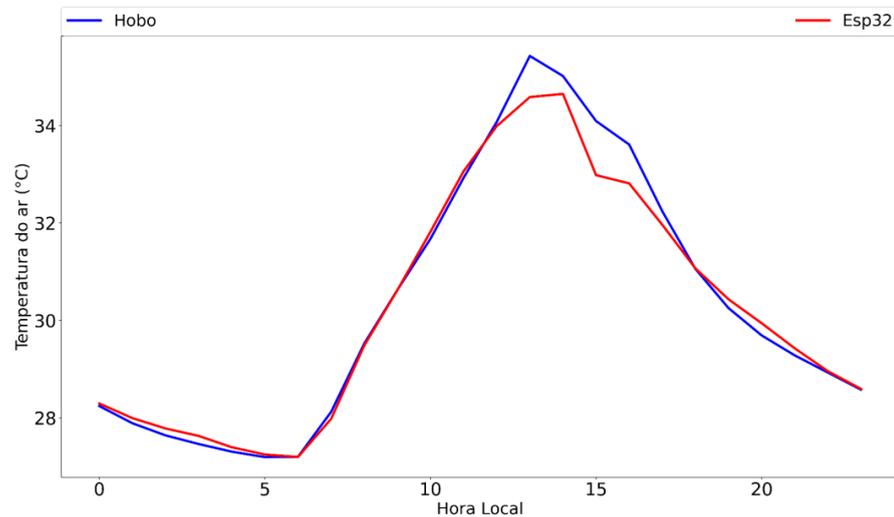
5. RESULTADOS

A comparação gráfica entre as variáveis está descrita nas Figuras 8, 9 e 10. A estatística descritiva está apresentada na Tabela 3 para as variáveis meteorológicas, temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica ao nível do mar.

Observa-se que a temperatura do ar (Figura 10) obtida pela ESP32 apresentou falhas no início e no fim da série temporal (Figura 10 (a)), esse comportamento associado a fragilidade do cabeamento utilizado para a ligação do sensor, que foi substituído. De maneira geral o DHT22 captura a variação temporal da temperatura do ar, porém nos mínimos (6h) e máximos (14h) a temperatura é subestimada, com um MBE de $-0,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tabela 3), esse comportamento é melhor descrito no ciclo diário, em que a temperatura do DHT22, não consegue capturar o máximo de temperatura diária, com um atraso de aproximadamente uma hora. Embora apresente essa subestimativa o sensor apresenta um espalhamento de $0,59^{\circ}\text{C}$ (RMSE) e o comportamento da temperatura DHT22 é concordante ao do U23 Pro v2 em 100% ($R^2 = 1.0$). Essa representatividade da medida do DHT22 é observada na Figura 11 (a).



(a)



(b)

Figura 10: Comparação da temperatura do ar °C, medidos pelo sensor DHT22 e o sensor U23 Pro v2. (a) Série temporal; (b) Ciclo diário.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A umidade relativa do ar, apresentou maior amplitude de diferença com MBE de 21,03 % e espalhamento de 19,47 %, tanto na série temporal (Figura 9(a)) quanto no ciclo diário, a umidade medida pelo DHT22 superestima o medido pelo U23 Pro v2, esse comportamento pode estar associado com a sensibilidade do sensor capacitivo em saturar mais rápido. Porém, o DHT22 acompanha a variabilidade diária da umidade relativa do ar, sendo inversamente proporcional ao comportamento da temperatura do ar. No entanto, ainda apresentou alta concordância com a umidade medida pelo U23 Pro v2 90% ($R^2 = 0.90$). Essa maior dispersão é retratada na Figura 11 (b).

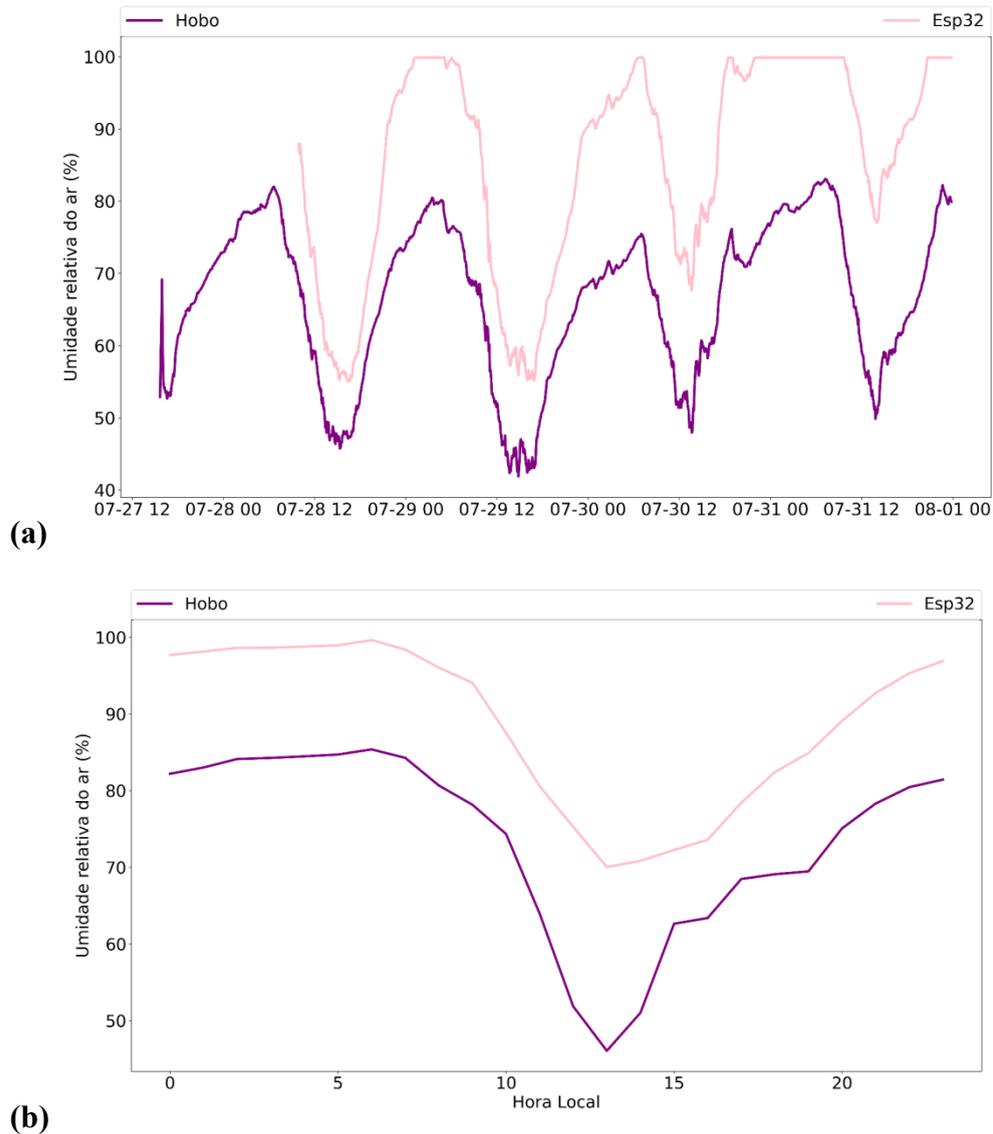


Figura 11: Comparação da umidade relativa do ar %, medidos pelo sensor DHT22 e o sensor U23 Pro v2. (a) Série temporal; (b) Ciclo diário.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A pressão atmosférica medida pelo BMP280, captura a variabilidade diária da pressão atmosférica (Figura (a)), com valores máximos às 10h e mínimos às 16h porém superestimando a pressão medida pelo HWS S-BPA-CM10, com MBE de 2,8 hPa e espalhamento de 2,8 hPa, essa superestimativa também é observada no ciclo diário (Figura 9 (b)). A pressão também apresentou forte concordância com $R^2 = 0.99$ (Figura 11 (c)).

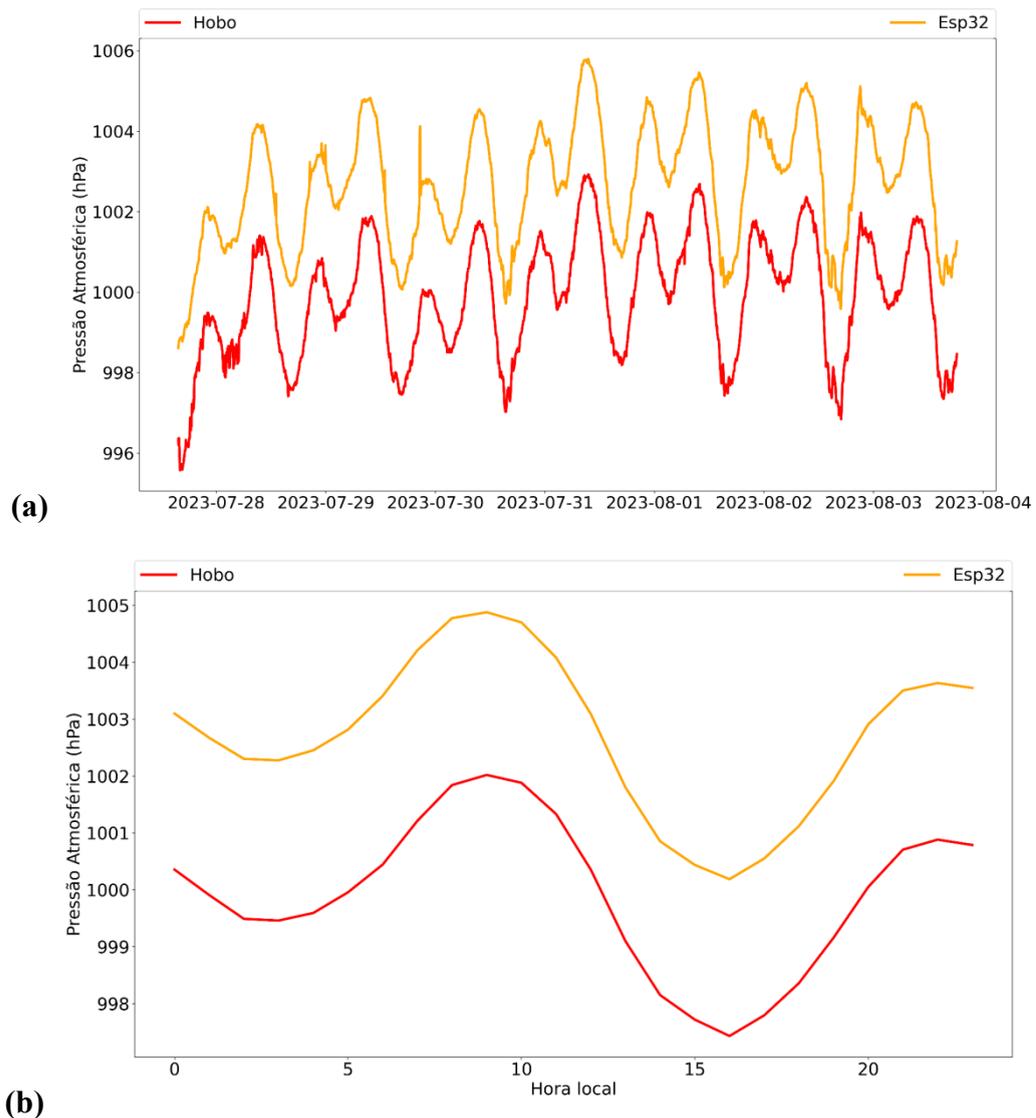


Figura 12: Comparação da Pressão Atmosférica, medidos pelo sensor BMP280 e o sensor HWS S-BPA-CM10.
(a) Série temporal; (b) Ciclo diário.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3: Estatística descritiva do desempenho dos sensores da ESP32 em relação aos sensores HOBO.

Variável	RMSE	MBE	R^2 (em gráficos na Figura 13)
Temperatura do ar	0,59 °C	-0,56 °C	1.00
Umidade relativa do ar	19,47 %	21,03 %	0,90
Pressão atmosférica	2,8 hPa	2,8 hPa	0,99

Fonte: Elaborada pelo autor.

Do ponto de vista estatístico, o MBE revela discrepâncias significativas apenas na umidade, onde os dados exibem uma amplitude maior, resultando em uma concordância ligeiramente menor como pode ser observado na Figura 13 (b), embora ainda substancial, atingindo 0,9 que é considerado um valor bom. Em contraste, a concordância para a temperatura do ar e a pressão foi de 1.0 e 0,99, respectivamente, de acordo com a Figura 13 (a) e 13(c).

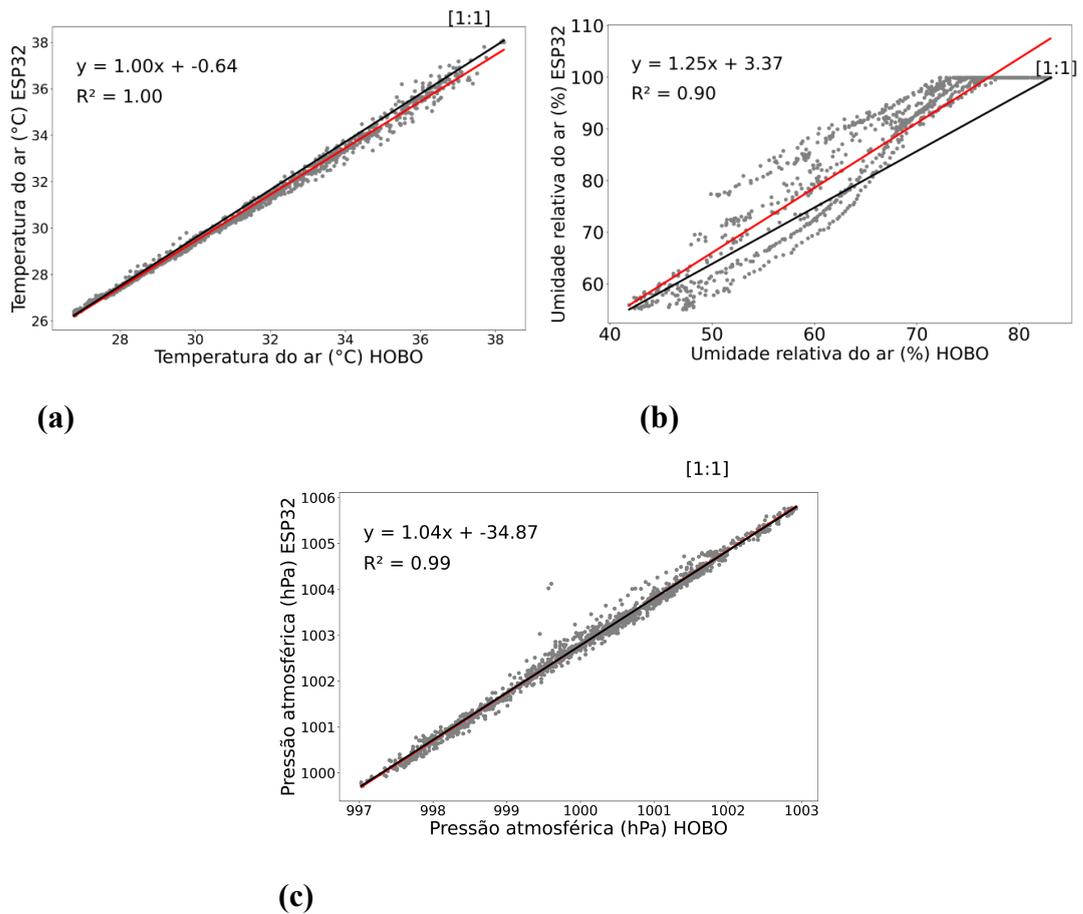


Figura 13: Regressão linear simples entre as variáveis medidas pelos sensores de baixo custo acoplados a ESP32-S e os sensores comerciais HOBO. (a) Temperatura do ar ; (b) Umidade relativa do ar ; (c) Pressão atmosférica.

Fonte: Elaborada pelo autor.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma solução de baixo custo para validação dos sensores acoplados na microcontroladora ESP32 com o intuito de comparar a acurácia desses valores com os valores de sensores da estação meteorológica comercial, a fim de propor soluções acessíveis para monitoramento climático, tendo em vista a importância desses estudos no momento atual em que a sociedade vivencia.

Em relação aos valores da estação meteorológica de baixo, os custos para a montagem deste trabalho foram de aproximadamente R\$ 200,00, um valor muito abaixo em relação ao da estação meteorológica Hobo, que custa em média de R\$ 20.000,00.

Neste cenário, os sensores de baixo custo acoplados na nodeMCU ESP32-S, representam a variabilidade temporal das variáveis, de modo a descrever a possibilidade de uso desses sensores de baixo custo para estudos climáticos, tendo em vista que a quantidade de estações meteorológicas atualmente instaladas são poucas, impossibilitando estudos aprofundados em diferentes regiões de uma cidade ou estado.

No entanto, como resultados gerais, foi observado que a temperatura subestimou os máximos e mínimos diários, a umidade relativa e a pressão superestimaram todo o ciclo diário. Todavia, estatisticamente o MBE mostra apenas a umidade com uma diferença entre os dados com maior amplitude, isso reflete na concordância menor, porém, ainda forte de 0.9 e a concordância da temperatura do ar e a pressão apresentaram concordância de 1 e 0,99 respectivamente. Portanto, o emprego dos sensores DHT22 e BMP20, para o monitoramento da temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, acoplados a microprocessada nodeMCU ESP32-S pode ser considerado viável, tanto pelo custo relativamente menor e por produzir resultados equivalentes com o encontrados pelos sensores HOBO.

Como trabalhos futuros sugere-se utilizar outros tipos de tipos sensores, de forma a acrescentar mais variáveis, como por exemplo precipitação, utilizando pluviômetros; direção e velocidade do vento, utilizando anemômetros e também sensores para análise de CO₂. Para praticidade na coleta de dados utilizar protocolos de comunicação sem fio, por exemplo comunicação via Bluetooth, LoraWan e 5G.

REFERÊNCIAS

CARRANCO, J. S., et al. "Comparative analysis of meteorological monitoring using an integrated low-cost environmental unit based on the Internet of Things (IoT) with an Automatic Meteorological Station (AWS)." *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. IEEE, 2017.

CULTIVO INTELIGENTE. O que são Estações Meteorológicas? 15 de setembro de 2023. Disponível em: <http://suporte.cultivointeligente.com.br/pt-BR/articles/3849049-o-que-sao-estacoes-meteorologicas>. Acesso em : 22 set. 2023.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Comunicado Técnico 4. Identificação, mapeamento e quantificação das áreas urbanas do Brasil. Campinas - SP, 2017.

ESP32. 2020. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/>. Acesso em: 09 set. 2023.

Instituto Nacional de Meteorologia, INMET. **Sobre Meteorologia**. Disponível em : <https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia> . Acesso 10/08/2023 16:04.

INSTRUMATIC. Sensor de Pressão: Características, Tecnologias e Tendências. Disponível em: <http://www.instrumatic.com.br/artigo/medicao-de-pressao-caracteristicas-tecnologias-e-tendencias>. Acesso em 17/11/2023.

MAKERHERO. Rtc Clock DS2307. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/relogio-rtc-ds1307-arduino/>. Acesso em 09 set. 2023

MAXIM, I. Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal. 2015. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>>. Acesso em 15 out. 2023.

MUNDO CLIMA. Como funciona e quais as vantagens da estação meteorológica? 17 de maio de 2017. Disponível em: <http://blog.mundoclima.com.br/como-funciona-e-quais-asvantagens-da-estacao-meteorologica/>. Acesso em: 09 set. 2023.

SIGMA SENSORS. Sensor de Temperatura. 2023. Disponível em: <<https://sigmasensors.com.br/sensor-temperatura>>. Acesso em 15 out. 2023.

SOBRINHO, A.F. Princípio de Funcionamento de Sensores. 2008. 70 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2008. Disponível em: <<file:///C:/Users/joadson/Downloads/ALMIR%20FARIAS%20DA%20PAIX%C3%83O%20SOBRINHO%20-%20TCC%20ENG.%20EL%C3%89TRICA%202008.pdf>> Acesso em 09 set. 2023.

SPIRIDONOV, V., et al. "Meteorological Measurements and Observations." *Fundamentals of Meteorology* (2021): 399-430. SYSTEMS, E. ESP32 Series datasheet. 2019.