

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**JOCÁSSIA REIS SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO  
AGROMETEOROLÓGICO PARA CASA DE VEGETAÇÃO**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2023**

**JOCÁSSIA REIS SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO  
AGROMETEOROLÓGICO PARA CASA DE VEGETAÇÃO**

Relatório final, apresentado à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.

Orientador: André Luiz de Freitas Coelho

Coorientadores: João Victor Pereira Oliveira  
Maria Angela de Souza

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2023**

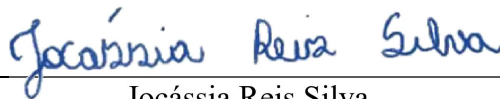
**JOCÁSSIA REIS SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO  
AGROMETEOROLÓGICO PARA CASA DE VEGETAÇÃO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.

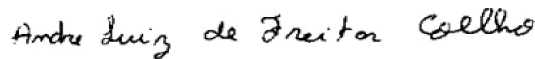
APROVADO: 14 de dezembro de 2023.

Assentimento:



---

Jocássia Reis Silva  
Autora



---

André Luiz de Freitas Coelho  
Orientador

**Aos meus avós (*In memoriam*) Lindaura e Irineu.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela dádiva da vida.

Aos meus pais, Josias e Estelita, por todo apoio, incentivo e pelo amor incondicional.

Ao Octávio, por sempre estar ao meu lado, por todo amor e incentivo.

Aos meus familiares por me incentivarem a seguir meu sonho.

Aos meus amigos por terem sido minha família em Viçosa e por terem compartilhado os melhores e os piores momentos da graduação.

Ao professor orientador André Luiz de Freitas Coelho, e aos coorientadores professor João Vitor Pereira Oliveira e Maria Angela de Souza, por todo apoio e orientação excepcional.

A Universidade Federal de Viçosa por ter sido minha casa em todos esses anos e por todos os valores ensinados.

Às entidades AMBIAGRO, PET e GECRA por terem contribuído na minha evolução pessoal e profissional.

Á todos que de alguma forma se fizeram presentes durante a minha caminhada e contribuíram de alguma forma na execução desse trabalho.

Muito obrigada.

**“É muito simples: só se vê bem com o coração. O essencial é invisível aos olhos.” (Livro  
O pequeno príncipe de Antonie Saint Exupery)**

## RESUMO

SILVA, Jocássia Reis, Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2023. **Desenvolvimento de sistema de monitoramento agrometeorológico para casa de vegetação.** Orientador: André Luiz de Freitas Coelho. Coorientadores: João Victor Pereira Oliveira e Maria Angela de Souza.

O sistema de cultivo convencional é amplamente adotado na agricultura devido ao seu baixo custo de implementação. Contudo, esse sistema é vulnerável às flutuações climáticas e à exposição de pragas e doenças, o que pode resultar em perdas na produtividade e qualidade final do produto. Em resposta a essas adversidades, o cultivo protegido, realizado em casas de vegetação, está sendo comumente adotado. Nesse sistema é fundamental realizar o monitoramento e controle das variáveis agrometeorológicas do ambiente interno, a fim de otimizar os processos produtivos. A utilização de sensores acoplados a sistemas de aquisição de dados automáticos tem gerado avanços na otimização dos processos produtivos agrícola. Eles permitem o acesso aos dados em tempo real, e, portanto, favorece o processo de tomada rápida de decisões. Assim, objetivou-se com esse trabalho desenvolver um sistema de monitoramento meteorológico de baixo custo para casas de vegetação. Foi realizado a montagem de dois sistemas idênticos. a partir da placa de desenvolvimento ESP32 e sensores de temperatura e umidade relativa do ar (BME 280), de dióxido de carbono (MH-Z19B) e de radiação fotossinteticamente ativa (RY-GH). Parte do sistema foi desenvolvido na plataforma Arduino IDE na linguagem C++. Foram realizadas a calibração de todos os sensores a partir de sensores de referência e análise de regressão para obtenção das curvas de calibração. Foram obtidos o tempo de resposta, a constante de tempo e a curva do tempo de resposta para os 3 sensores utilizados. E por fim, foi realizado a validação dos sistemas desenvolvidos instalando-os em uma casa de vegetação, realizando a análise dos dados em duas etapas. Na primeira etapa foi avaliada correlação de Pearson, RMSE, MAE, erro relativo médio dos sistemas com seus respectivos sensores de referência e na segunda etapa foi avaliado o funcionamento do sensor durante 158 dias. Assim, o sistema desenvolvido apresentou um custo final de construção de aproximadamente R\$ 692,94 ou US\$ 140,84. As curvas de calibração obtidas para os três sensores foram adequadas para corrigir os dados informados pelos dois sistemas a partir dos dados dos sensores de referência, apresentando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) em uma faixa de 0,88 a 0,99. O tempo de resposta do sensor MH-Z19B foi de 30 s, o do RY-GH de 1,4 s e o do BME 280 de 24 s. Na validação dos sensores foi possível observar que os três sensores, de ambos os sistemas, apresentaram uma forte correlação com os sensores de referência. E

ainda, durante todo o período de validação as variáveis analisadas apresentaram oscilações normais ao longo do tempo, sendo que os sistemas não apresentaram falhas que resultassem em dados incorretos ou ausência de dados.

**Palavras-chave:** Cultivo protegido. Microcontrolador. Sensor. Sistema embarcado.

## ABSTRACT

SILVA, Jocássia Reis, Universidade Federal de Viçosa, December ,2023. **Development of an agrometeorological monitoring system for a greenhouse.** Adviser: André Luiz de Freitas Coelho. Coadviser: João Victor Pereira Oliveira and Maria Angela de Souza.

The conventional farming system is widely adopted in agriculture due to its low implementation cost. However, this system is vulnerable to climate fluctuations and exposure to pests and diseases, which can result in losses in productivity and final product quality. In response to these adversities, protected cultivation, carried out in greenhouses, is being commonly adopted. In this system, it is essential to monitor and control the agrometeorological variables of the internal environment, to optimize production processes. The use of sensors coupled to automatic data acquisition systems has generated advances in the optimization of agricultural production processes. Because it allows access to data in real time, and therefore favors the process of rapid decision-making. Thus, the objective of this work was to develop a low-cost meteorological monitoring system for greenhouses. Two identical systems were assembled. from the ESP32 development board and sensors for temperature and relative humidity (BME 280), carbon dioxide (MH-Z19B) and photosynthetically active radiation (RY-GH). Part of the system was developed on the Arduino IDE platform in the C++ language. Calibration of all sensors was performed using reference sensors and regression analysis was performed to obtain calibration curves. The response time, time constant and response time curve for the 3 sensors used were obtained. Finally, the developed systems were validated by installing them in a greenhouse, performing data analysis in two stages. In the first stage, Pearson's correlation, RMSE, MAE, average relative error of the systems with their respective reference sensors were evaluated and in the second stage the functioning of the sensor was evaluated for 158 days. Thus, the developed system had a final construction cost of approximately R\$692.94 or US\$140.84. The calibration curves obtained for the three sensors were adequate to correct the data reported by the two systems based on data from the reference sensors, presenting the coefficient of determination ( $R^2$ ) in a range of 0.88 to 0.99. The response time of the MH-Z19B sensor was 30 s, that of the RY-GH was 1.4 s and that of the BME 280 was 24 s. When validating the sensors, it was possible to observe that the three sensors, from both systems, showed a strong correlation with the reference sensors. Furthermore, throughout the validation period, the analyzed variables showed normal oscillations over time, with the systems did not present failures that resulted in incorrect data or missing data.

**Keywords:** Protected cultivation. Microcontroller. Sensor. Embedded System.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Desenvolvimento do sistema de monitoramento .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Processo de calibração dos sensores do sistema de monitoramento.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Determinação do tempo de resposta do sistema de monitoramento .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Validação do sistema de monitoramento .....</b>	<b>19</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Curva de calibração dos sensores.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 Curva do tempo de resposta, tempo de resposta e constante de tempo .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Validação dos sistemas de monitoramento agrometereológico .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.1 Validação em relação aos sensores de referência.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.2 Validação em relação ao funcionamento do sistema .....</b>	<b>46</b>
<b>4 CONCLUSÃO .....</b>	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No contexto brasileiro, a agricultura assume um papel de destaque no incremento do Produto Interno Bruto (PIB), na geração de empregos e nas exportações, tornando assim, o país o quarto maior produtor de alimentos do mundo (EMBRAPA, 2018). Um dos principais desafios contemporâneos da agricultura é a crescente demanda por alimentos (TILMAN *et al.*, 2011). Nesse cenário, em virtude da exigência de alimentos de alta qualidade e das limitações relacionadas à expansão territorial e à disponibilidade de insumos eficazes para a produção agrícola, tem-se observado a emergência de novas tecnologias destinadas a potencializar a produtividade e a qualidade dos produtos agrícolas (WILLETT *et al.*, 2019).

O sistema de cultivo convencional é amplamente adotado na agricultura devido ao seu baixo custo de implementação. Contudo, torna-se vulnerável às flutuações climáticas e à exposição de pragas e doenças, o que pode resultar em perdas significativas em termos de produtividade e qualidade do produto final (BRZEZINSKI *et al.*, 2017). Portanto, este sistema pode demandar a utilização de uma maior quantidade de insumos químicos, como fertilizantes sintéticos e pesticida, para favorecer a produção e proteger o cultivo de pragas e doenças. É crucial destacar que a produção em grande escala pode gerar problemas tanto ambientais quanto para saúde humana devido ao uso intensivo de produtos químicos e à manipulação do solo. Por isso, nas últimas décadas, tem havido um interesse crescente por práticas alternativas, como a agricultura orgânica, a agricultura de conservação e o cultivo protegido (SANTOS *et al.*, 2023).

Em resposta a essas adversidades apresentadas, o cultivo protegido, realizado em casas de vegetação, têm sido comumente adotados. Este sistema apresenta como vantagem o aumento da produtividade, o favorecimento da qualidade dos produtos, a possibilidade de cultivar durante todo o ano e um controle mais preciso das condições ambientais. Porém, o sistema em cultivo protegido exige um maior investimento inicial em comparação com o cultivo convencional. O fator determinante para o sucesso no cultivo protegido é a adoção de tecnologias que possibilitem o monitoramento e o controle das condições ambientais (PURQUERIO *et al.*, 2013).

É fundamental realizar o monitoramento e controle das variáveis agrometeorológicas do ambiente interno de casas de vegetação como a temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e concentração de gases, afim de se obter um bom desenvolvimento das culturas. Esse processo envolve a coleta e análise de dados relacionados a essas variáveis (NUNES *et al.*, 2020). Além disso, é de suma importância compreender de que maneira o comportamento

das variáveis agrometeorológicas afetam as atividades fisiológicas das plantas, abrangendo o processo de fotossíntese, o crescimento e o desenvolvimento vegetal, o que, por sua vez, repercute diretamente na produtividade e qualidade das mesmas (SILVA *et al.*, 2002).

Dentre os gases presentes no ambiente interno das casas de vegetação, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) apresenta grande relevância, pois a sua presença em concentrações de 600 a 700 partes por milhão (ppm) pode favorecer o desenvolvimento das plantas (LESSIN *et al.*, 2009; WALTER *et al.*, 2015). Isso ocorre porque o CO<sub>2</sub> é o principal substrato para que a fotossíntese ocorra, ou seja, a presença de CO<sub>2</sub> provoca aceleração dos processos fisiológicos das plantas. No Brasil, está sendo utilizado o enriquecimento da atmosfera do ambiente interno de casas de vegetação com CO<sub>2</sub> devido ao fato de provocar o aumento nas taxas de crescimento das plantas (WALTER *et al.*, 2015). Dessa forma, torna-se necessário o monitoramento da concentração desse gás no interior das casas de vegetação.

Os sensores são dispositivos utilizados para quantificar uma determinada quantidade física que associados a outros componentes eletrônicos são capazes de transmitir informações sobre o que está sendo observado (NUNES *et al.*, 2020). Para o monitoramento de variáveis agrometeorológicas, inclusive a concentração de gases, diversos fabricantes disponibilizam no mercado uma gama de sensores, portáteis ou fixos, com ou sem sistemas de armazenamento de dados, capazes de atender às diversas demandas dos usuários. No entanto, esses equipamentos muitas vezes apresentam elevado custo de aquisição e também demandam conhecimento técnico para sua utilização, o que podem atuar como um empecilho para a sua aquisição por pequenos e médios agricultores, pois estes apresentam menor capacidade de investimento e menor nível de tecnificação (MARQUES FILHO *et al.*, 2021) Por isso, torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas de baixo custo, eficientes, confiáveis e de fácil operação a fim de otimizar os processos produtivos (PAES *et al.*, 2022). Pois, a utilização de sensores acoplados a sistemas de aquisição de dados automáticos tem gerado avanços na otimização dos processos produtivos agrícolas, por permitir o acesso aos dados em tempo real, e, portanto, a tomada rápida de decisões (MORAES *et al.*, 2004). Uma opção para o desenvolvimento de sistemas de baixo custo é a utilização de novas tecnologias e plataformas de prototipação e de código aberto (DA CUNHA, 2013). A partir da utilização de novas tecnologias associadas à automação e ao uso de sensores, além de tecnologias como *internet* das coisas e sistemas embarcados, é possível desenvolver sistemas de monitoramento de baixo custo para o meio agrícola (TERUEL, 2010).

Nesse contexto, vários sistemas foram desenvolvidos para monitorar as variáveis meteorológicas em instalações de produção vegetal, integrando sensores de baixo custo e placas de desenvolvimento, como evidenciado nos estudos de Lara *et al.* (2019), Marques Filho *et al.*

(2021) e Vimal *et al.* (2018). No entanto, até o momento, nenhum desses sistemas relatou a bem-sucedida implementação de sensores de radiação solar e de CO<sub>2</sub>, bem como a instalação do sistema em uma casa de vegetação específica.

Com isso, objetivou-se com este trabalho, desenvolver um sistema de monitoramento agrometeorológico de baixo custo para casas de vegetação. Os objetivos específicos foram : i) montar o sistema de monitoramento com sensores de baixo custo; (ii) calibrar os sensores de baixo custo para medição de concentração de dióxido de carbono, temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar fotossinteticamente ativa; (iii) determinar o tempo de resposta dos sensores de temperatura do ar, concentração de CO<sub>2</sub> e radiação solar fotossinteticamente ativa; e (iv) validar o sistema de monitoramento agrometeorológico desenvolvido em casa de vegetação.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O sistema de monitoramento agrometeorológico para casas de vegetação foi desenvolvido no Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA), do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa-MG. A calibração foi realizada no LMA, na área experimental do Núcleo de Pesquisa em Ambiente e Engenharia de Sistemas Agroindustriais (AMBIAGRO), da Área de Construções Rurais e Ambiente (DEA/UFV) e no Viveiro Florestal do Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV). A validação do sistema foi realizada em uma casa de vegetação localizada na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão em Manejo, Produção, Melhoramento e Conservação de Recursos Fitogenéticos de Hortaliças e Sistemas Agroecológicos (UEPE MFHA) - Horta Velha do Departamento de Agronomia (DAA/UFV).

### 2.1 Desenvolvimento do sistema de monitoramento

Para o desenvolvimento do sistema de monitoramento agrometeorológico para casas de vegetação foi utilizado a placa de desenvolvimento ESP32, modelo DOIT ESP32 - ESP32-WROOM-32D com processador: Xtensa 32-Bit LX6 Dual Core. O programa de computador a ser executado na ESP32 foi desenvolvido utilizando a plataforma Arduino IDE e a linguagem C++. Foram conectados à placa microcontroladora ESP32 três sensores, para quantificar as variáveis térmicas, a emissão de gás e a radiação fotossinteticamente ativa (PAR, do inglês *Photosynthetically Active Radiation*), envolvidas no processo de produção vegetal (Tabela 1).

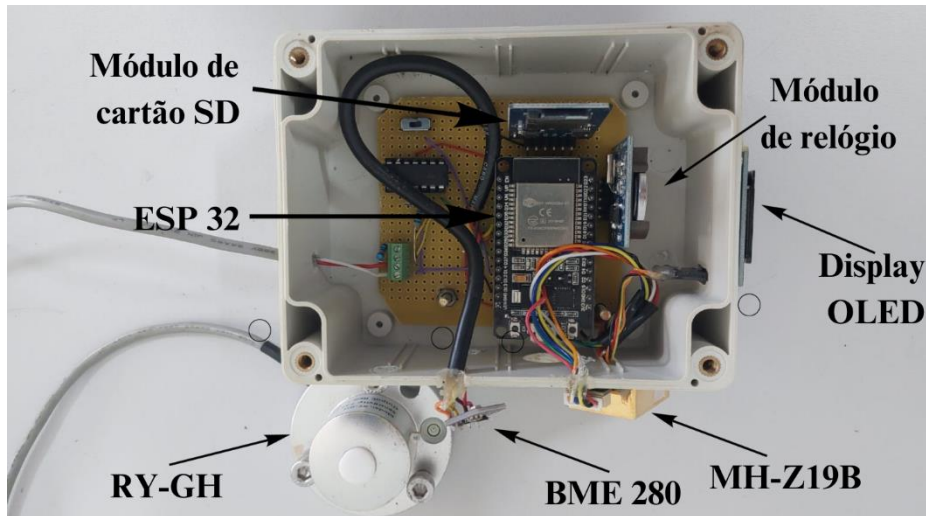
Tabela 1 – Sensores utilizados no desenvolvimento do sistema de monitoramento agrometeorológico

<b>SENSOR</b>	<b>VARIÁVEL</b>	<b>FABRICANTE</b>	<b>TENSÃO DE OPERAÇÃO (V)</b>	<b>FAIXA DE MEDIÇÃO</b>
MH-Z19B	Concentração de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd, China	3,6 a 5,5	0 a 5000 partes por milhão (ppm)
BME 280	Temperatura do ar Umidade Relativa do ar Pressão Barométrica	BOSH, Alemanha	3,0 a 3,3	Temperatura do ar de -40 a +85°C  Umidade Relativa do ar de 0 a 100%  Pressão Barométrica de 300 a 1100Pa
RY-GH	Radiação Fotossinteticamente Ativa	Handan Yunnong Intelligente Agricultural Technology Co., Ltd, China	-	400 a 700 nm.

Fonte: Autores.

Foi acoplado no sistema, um módulo de relógio DS1307 para obtenção da data e hora atual, um módulo de cartão de memória SD para auxiliar no armazenamento dos dados, e um visor OLED com resolução de 128x64 pixels, que forneceu uma interface visual para a apresentação dos dados. O sistema foi soldado em uma placa com dimensões de 0,10 m x 0,10 m (comprimento x largura) e instalado dentro de uma caixa plástica (Figura 1) com dimensões de 0,115 m x 0,090 m x 0,055 m (comprimento x largura x altura), o qual servia de proteção para que os sensores não fossem expostos ao ambiente. Uma fonte de alimentação de 5V de corrente contínua foi utilizada para fornecimento de energia ao sistema. O sistema foi programado para obter os dados a cada um minuto e apresentá-los na tela de visualização, e o salvamento no cartão de memória ocorria a cada 5 minutos.

Figura 1 – Componentes do sistema de monitoramento agrometeorológico desenvolvido



Fonte: Autores.

## 2.2 Processo de calibração dos sensores do sistema de monitoramento

Para a calibração do sensor MH-Z19B (Figura 2), responsável pela medição da concentração de CO<sub>2</sub>, diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> foram obtidas a partir de uma fonte controlada de emissão de gás CO<sub>2</sub> no ambiente interno de uma mini casa de vegetação, contendo mudas de eucalipto, com sistema de fechamento das laterais e com sistema de injeção de gás CO<sub>2</sub>, obtendo-se um ambiente fechado e com possibilidade de variação gradativa da concentração do gás. Para a medição da concentração real de CO<sub>2</sub> foi empregado um medidor de gases DG-300, da marca *Instrutherm* com faixa de medição de CO<sub>2</sub> entre 0 e 9999 ppm, resolução de 1ppm e precisão de  $\pm 5\%$  da leitura  $\pm 75$  ppm, como sensor de referência. Os dois sensores foram colocados dentro dessa mini casa de vegetação e a concentração de CO<sub>2</sub> foi medida pelos dois sistemas desenvolvidos e pelo medidor DG-300 e foram registradas em intervalos de um minuto. A calibração consistiu em obter uma equação, a partir de regressão linear, para corrigir os valores fornecidos pelo sensor MH-Z19B.

Figura 2 – Posicionamento dos equipamentos no processo de calibração do sensor de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) do sistema desenvolvido dentro da mini casa de vegetação



Fonte: Autores.

A calibração do sensor BME 280 (Figura 3), responsável pela medição de temperatura e umidade relativa do ar, foi realizada em ambiente aberto. Como sensor de referência, foi utilizado o termo-higrômetro com *datalogger* da marca Onset, modelo HOBO UX 100-003 com faixa de operação e medição da temperatura de  $-20$  a  $+70$  °C, resolução  $0,024$  °C a  $25$  °C e precisão  $\pm 0,21$  °C ( $0$  °C a  $50$  °C), faixa de operação da umidade relativa de  $0$  a  $95$  % e de medição é de  $15$  a  $95$  %, com resolução de  $30$  % e precisão de  $\pm 3,5$  % ( $25$  % a  $85$  % de umidade relativa) (ONSET, 2013). Foram utilizados três termo-higrômetros com *datalogger*, o qual foram posicionados próximos ao sensor BME 280. A coleta de dados teve duração de 72 horas, com registros de dados a cada 10 minutos. A calibração do sensor BME280 incluiu o estabelecimento de equações de correção para os valores de temperatura e umidade relativa do ar, por meio da análise de regressão.

Figura 3 – Posicionamento dos equipamentos no processo de calibração do sensor de temperatura e umidade relativa do ar do sistema desenvolvido, em um ambiente aberto



Fonte: Autores.

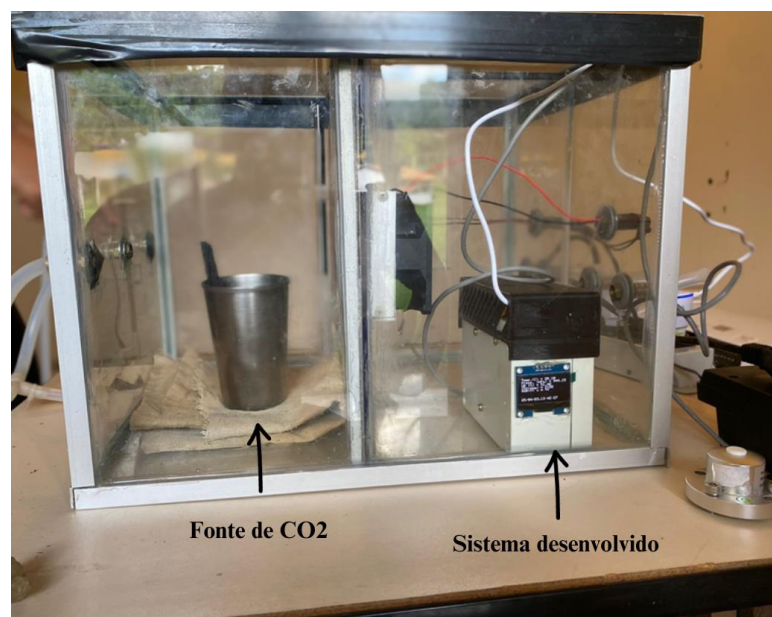
A calibração do sensor RY-GH, responsável pela medição da radiação solar fotossinteticamente ativa, foi feita em ambiente externo e aberto com exposição à radiação solar. Foi utilizado o sensor LI-1440 da marca LI-COR equipado com um *datalogger*, com faixa de medição de  $0 \pm 250 \mu\text{A}$  e resolução de  $7.6 \text{ pA}$ , como sensor de referência. O sensor RY-GH gerou um sinal elétrico analógico cuja tensão variou conforme a radiação fotossintética ativa incidente. A coleta de dados foi realizada em um dia ensolarado, durante um período de 5 horas, com intervalo de tempo a cada 2 minutos. A calibração envolveu o desenvolvimento de equações para calcular a radiação fotossinteticamente ativa a partir da tensão do sinal elétrico produzido pelo sensor, utilizando análise de regressão.

### 2.3 Determinação do tempo de resposta do sistema de monitoramento

O tempo de resposta de um sensor é o tempo necessário para fornecimento de um sinal significativo (corresponde a 90 % do sinal de estado estável), quando há alteração na variável que está sendo medida (HUNTER *et al.*, 2020). Sendo assim, a avaliação do tempo de resposta do sensor de  $\text{CO}_2$ , foi realizada em uma caixa normalizadora (Figura 4) a qual possui dois compartimentos sendo um setor de entrada e outro de saída de gás com dimensões  $0,30 \text{ m} \times 0,18 \text{ m} \times 0,28 \text{ m}$  (comprimento  $\times$  largura  $\times$  altura), fabricado em vidro (SOUSA *et al.*, 2015).

O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> foi obtida a partir da queima controlada de carvão vegetal. O sensor de referência DG-300 foi empregado para verificar a concentração de CO<sub>2</sub> dentro do ambiente e quando a mesma estivesse em um valor fixado de 5000 ppm (limite máximo do MH-Z19B) o sistema desenvolvido foi rapidamente colocado dentro do recipiente. Antes de submeter o sistema de monitoramento ao recipiente fechado, o sensor estava em ambiente aberto (concentração 400 - 500 ppm). As medições de CO<sub>2</sub> informadas pelo sensor foram armazenados a cada 100 milissegundo, sendo realizadas três repetições. Os dados foram utilizados para elaborar a curva do tempo de resposta do sensor, calcular o tempo de resposta e a constante de tempo.

Figura 4 – Disposição do sistema desenvolvido e da fonte de emissão do gás dióxido de carbono no interior da caixa normalizadora para a avaliação do tempo de resposta do sensor de dióxido de carbono



Fonte: Autores.

A avaliação do tempo de resposta do sensor BME 280, foi realizada em um ambiente fechado (interior de refrigerador) cuja temperatura era próxima a 0 °C. O sensor de referência, termo-higrômetro, foi colocado previamente no ambiente refrigerado para medição da temperatura e umidade relativa do ar real. Similar ao procedimento adotado para o MH-Z19B, o sensor BME 280 foi mantido em ambiente aberto, e rapidamente inserido no ambiente refrigerado. O sistema registrou os dados de temperatura e umidade relativa do ar a cada 100 milissegundo, sendo realizadas três repetições. Os dados obtidos de temperatura do ar e

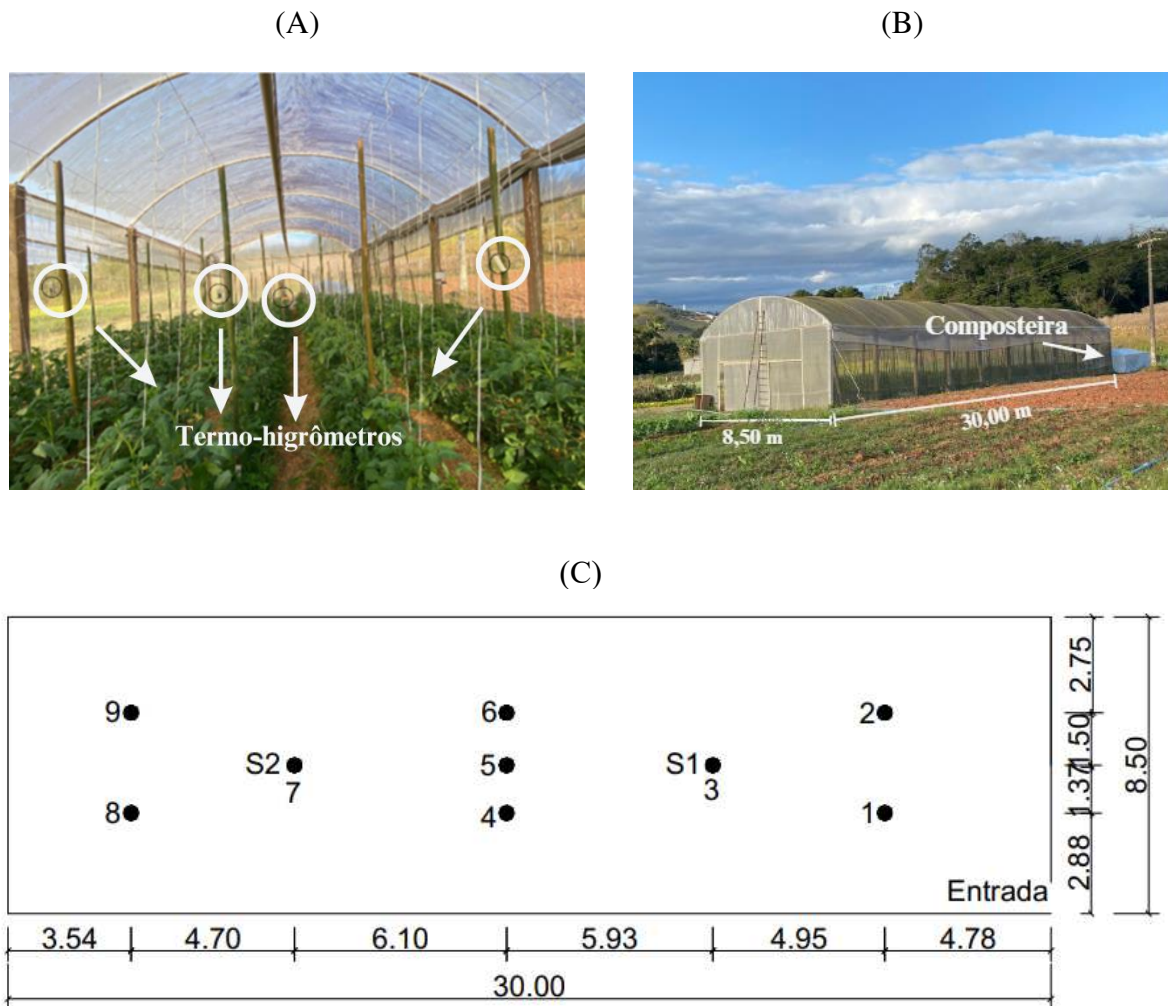
umidade relativa do ar foram utilizados para elaborar a curva do tempo de resposta do sensor, calcular o tempo de resposta e a constante de tempo.

A avaliação do tempo de resposta do sensor RY-GH, foi realizada em um ambiente aberto e em um dia ensolarado. O sensor, foi submetido a radiação solar e posteriormente colocado em um ambiente que tinha a presença de sombra, ou seja, sem a presença de radiação solar. Os dados de radiação solar foram coletados a cada 100 milissegundo, em três repetições, e foram utilizados para elaborar a curva do tempo de resposta do sensor, calcular o tempo de resposta e a constante de tempo.

#### **2.4 Validação do sistema de monitoramento**

A validação das duas unidades do sistema desenvolvido foi realizada em uma casa de vegetação (Figura 5), ocupada com o cultivo de tomates na presença de um ambiente enriquecido com gás CO<sub>2</sub> gerado a partir da decomposição de esterco de avicultura e bovinocultura. O período de validação foi de 158 dias, com coleta de dados sendo realizada automática e a cada 5 minutos. Durante esse período foi avaliada a estabilidade de funcionamento do sensor bem como a variação das variáveis temperatura, umidade relativa do ar, CO<sub>2</sub> e PAR ao longo do tempo.

Figura 5 – Casa de vegetação, com cultivo de tomate e com enriquecimento de gás dióxido de carbono por composteira, onde os sistemas de monitoramento desenvolvidos foram validados. A – ambiente interno com a indicação da posição dos termo-higrômetros, B – ambiente externo com a indicação da composteira e C – disposição dos termo-higrômetros dentro da casa de vegetação durante o período de validação (S1 – Sistema desenvolvido 1; S2 – Sistema desenvolvido 2; 1 a 9 – Termo-higrômetros; Dimensões em metros)



Fonte: Autores.

Além disso, foi realizada a validação dos valores medidos por cada um dos sensores que compunham o sistema desenvolvido. A concentração de CO<sub>2</sub> no interior da casa de vegetação foi quantificada utilizando o sensor de referência, uma única vez durante o período de validação, por um período de 4 horas com coleta de dados a cada 15 minutos. A temperatura do ar e umidade relativa do ar foram monitoradas por 9 termo-higrômetros, sendo quatro do modelo HOB0 UX 100-003 e cinco do modelo HOB0 H14-001, termo-higrômetro com *datalogger* da

marca Onset, com faixa de operação e medição da temperatura de -20 °C a 50 °C e precisão de  $\pm 0,7$  °C a 20 °C, faixa de operação e medição da umidade relativa de 15 a 95% e precisão de  $\pm 3\%$  (ONSET, 2004). Os termo-higrômetros foram posicionados a 1,50 m do nível do solo, distribuídos na área da casa de vegetação afim de se obter a temperatura média da casa de vegetação, durante 15 dias no período de validação com coleta de dados a cada 10 minutos. A radiação fotossinteticamente ativa foi determinada utilizando o sensor de referência, uma vez durante o período de validação, em um dia ensolarado por um período de 4 horas com coleta de dados a cada 5 minutos.

Para a validação dos três sensores contidos no sistema de monitoramento desenvolvido, os valores informados por eles foram comparados com os valores dos respectivos sensores de referência (os mesmos utilizados na calibração e na determinação do tempo de resposta). Foram calculados e analisados a correlação de Pearson (Equação 1) e a obtenção de métricas de erros, sendo a Raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 2), o Erro médio absoluto (MAE) (Equação 3) e o erro relativo médio.

$$\text{Pearson} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2][\sum(y_i - \bar{y})^2]}} \quad (1)$$

em que:

$x_i$  = valores da variável x;

$y_i$  = valores da variável y;

$\bar{x}$  = médias dos valores da variável x;

$\bar{y}$  = médias dos valores da variável y.

$$\text{RSME} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

em que:

$\hat{y}_i$  = valor predito;

$y_i$  = valor real;

n = número de observações.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

em que:

$\hat{y}_i$  = valor predito;

$y_i$  = valor real;

$n$  = número de observações.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O custo dos componentes eletrônicos, dispositivos acessórios e de suporte para a produção de uma unidade do sistema monitoramento agrometeorológico (Tabela 2) foram obtidos através de pesquisas em lojas virtuais em 03/12/2023. O custo total de uma unidade do sistema desenvolvido foi R\$ 692,94, ou US\$ 140,84 (considerando o valor do dólar americano em 03/12/2023 – R\$4,92). Com esse custo de produção, o sistema desenvolvido pode ser classificado de baixo custo, e deve-se, principalmente, à utilização de componentes de *open source hardware* e *open source software* (FISHER & GOLD, 2012).

Tabela 2 – Custos dos componentes para confecção de uma unidade de monitoramento agrometeorológico

COMPONENTE	VALOR (R\$)*
Placa de desenvolvimento ESP 32	46,40
Sensor MHZ-19B	129,00
Sensor BME 280	52,00
Senso RY-GH	286,16
Módulo de relógio - DS1307	8,90
OLED - 128x64 pixels	33,16
Módulo de cartão de memória – SD Card	8,40
Placa de solda	12,82
2 kits de jumpers macho e fêmea	26,00
1 kit de soquete macho e fêmea	25,50
Cartão de memória 32 GB	26,90
Caixa Plástica	20,80
Fonte de alimentação	16,90
<b>TOTAL</b>	<b>692,94 (US\$ 140,84) **</b>

\* cotação em lojas virtuais em 03/12/2023; \*\* 1 US\$ = R\$ 4,92

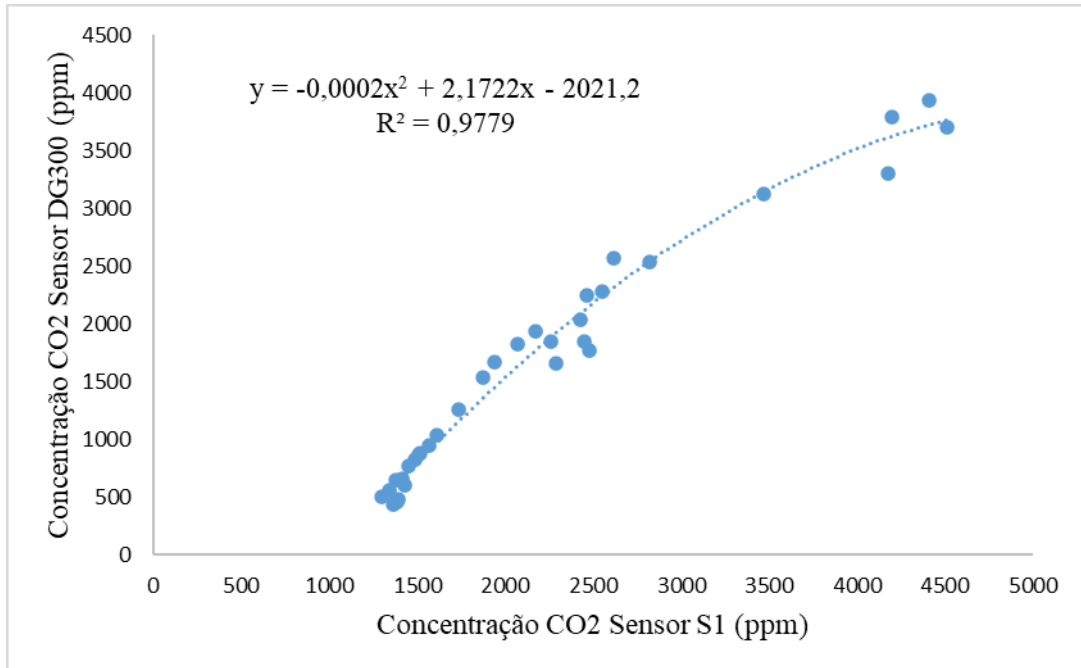
Fonte: Autores.

#### 3.1 Curva de calibração dos sensores

Na Figura 6 é apresentada a curva e equação de calibração do sensor de CO<sub>2</sub>, MH-Z19B, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). A curva de calibração gerada foi de segundo grau e

apresentou um intercepto no valor de 2021,2, um coeficiente angular de  $-0,0002$  e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9779.

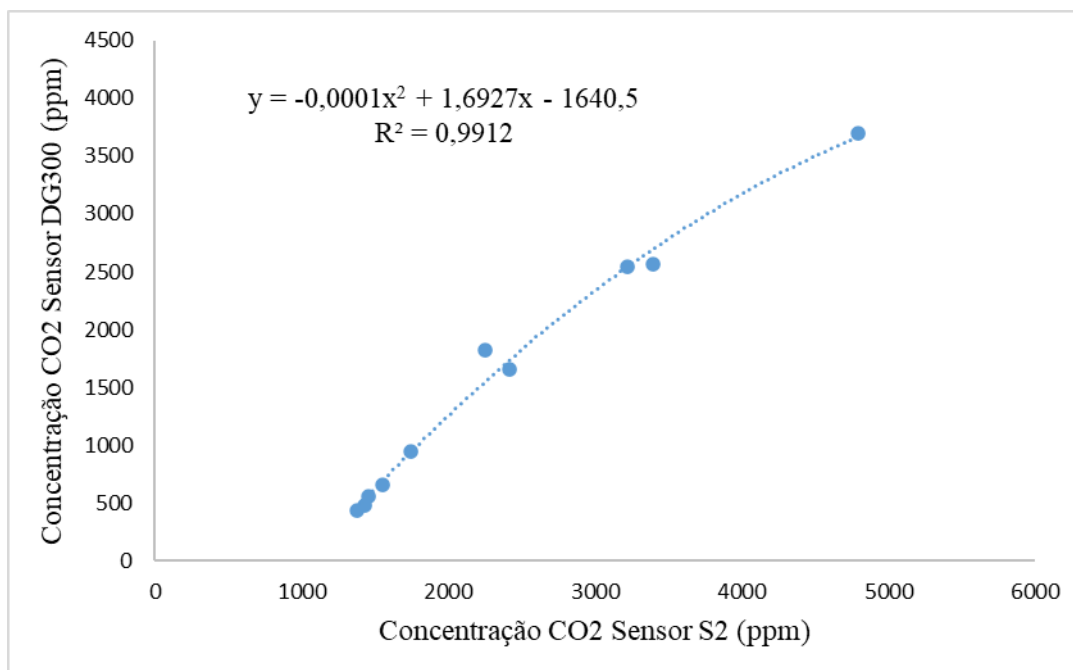
Figura 6 – Curva e equação de calibração do sensor de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) do Sistema 1 (S1)



Fonte: Autores.

De forma similar, a curva de calibração gerada para o S2 (Figura 7), também foi de segundo grau e apresenta um intercepto no valor de 1640,5, um coeficiente angular de  $-0,0001$  e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9912. As curvas de calibração dos dois sistemas foram adequadas para corrigir os dados informados a partir dos dados do sensor de referência.

Figura 7 – Curva e equação de calibração do sensor de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do Sistema 2 (S2)

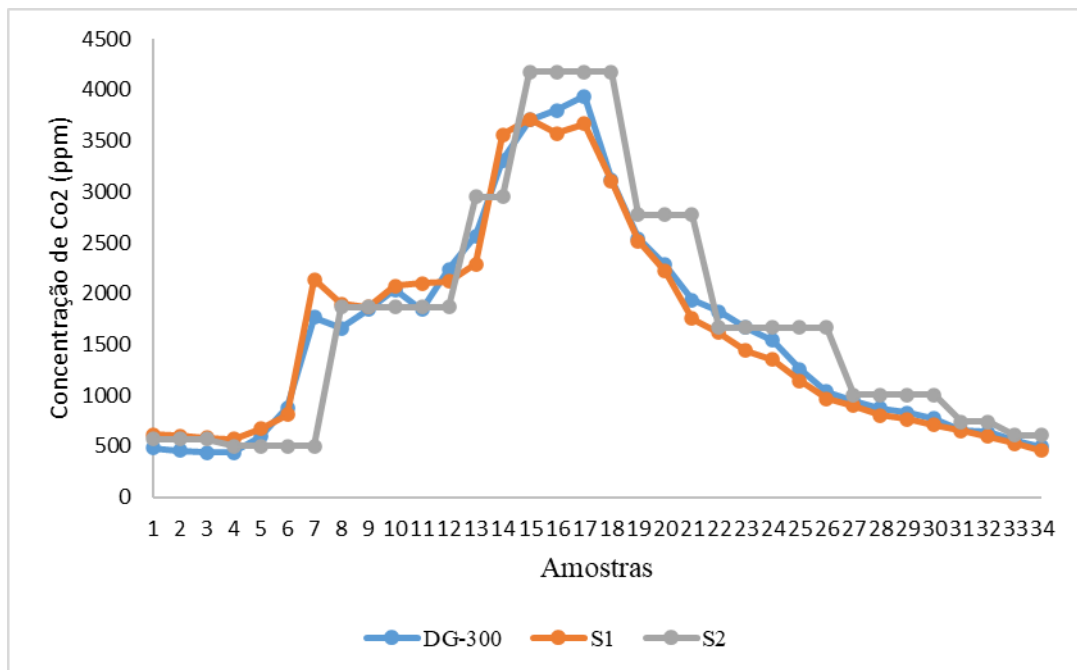


Fonte: Autores.

Foi observado (Figura 6 e 7) que os valores apresentados pelos sensores de CO<sub>2</sub> dos sistemas 1 e 2 antes da calibração foram superiores aos valores apresentados pelo sensor DG-300 (sensor de referência), indicando que a calibração de fábrica precisou ser corrigida. Porém, mesmo com calibração de fábrica gerando valores incorretos, os sensores foram capazes de detectar a variação da concentração de gás do ambiente. É importante destacar que as duas curvas de calibração geradas são válidas apenas para leituras entre 500 e 4000ppm.

Durante a calibração do sensor MH-Z19B dos sistemas 1 e 2, foi observada a variação da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo, a partir da injeção do gás CO<sub>2</sub> (Figura 8). Tanto para o sistema 1 quanto para o 2 foi possível notar que antes do início da injeção do gás, os valores apresentados no gráfico são da condição do gás em concentração ambiente. Com a injeção do gás, foi possível observar um aumento da concentração até o pico de 4000ppm e ao interromper a injeção, houve a queda até o valor da concentração do ambiente. Além disso, o coeficiente de Pearson para o sistema 1 foi 0,989 e para o sistema 2 foi 0,995. Portanto, foi possível perceber que os valores medidos por ambos os sistemas apresentaram uma forte relação com os valores do sensor de referência, indicando que a curva de calibração obtida foi adequada para a correção.

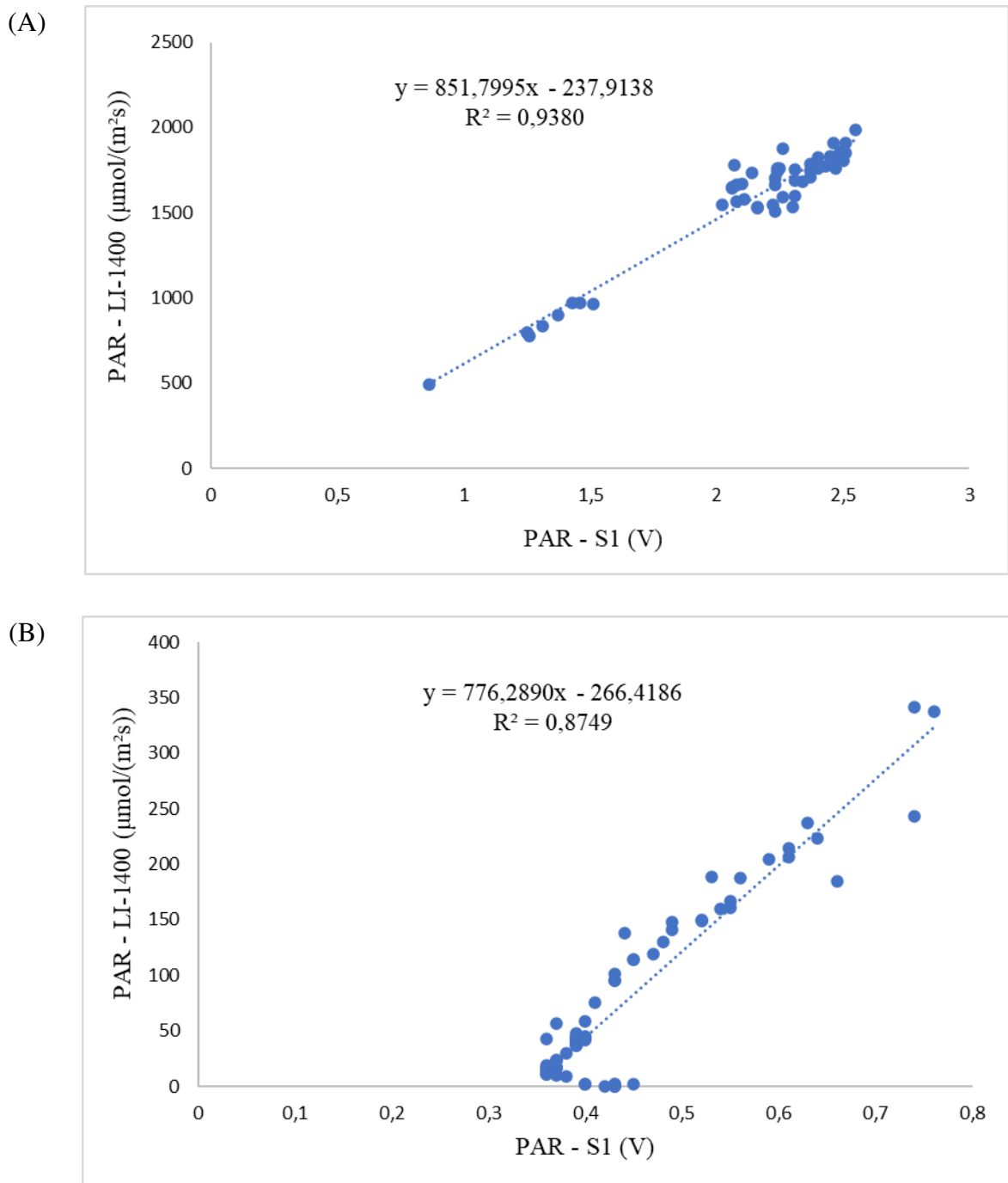
Figura 8 – Variação da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo durante o processo de calibração



Fonte: Autores.

Na Figura 9 é apresentada a curva e equação de calibração do sensor de PAR, RY-GH, contido no sistema desenvolvido 1 (S1) e 2 (S2). A curva de calibração gerada para valores maiores que 0,75V (Figura 9A) apresentou um intercepto no valor de 237,9138, um coeficiente angular de 851,7995 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9380. De forma similar, a curva de calibração para valores menores que 0,75V (Figura 9B) apresentou um intercepto no valor de 266,4186, um coeficiente angular de 776,2890 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,8749.

Figura 9 – Curva e equação de calibração do sensor de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) para valores maiores (A) e menores (B) que 0,75 (V) do Sistema 1 (S1)



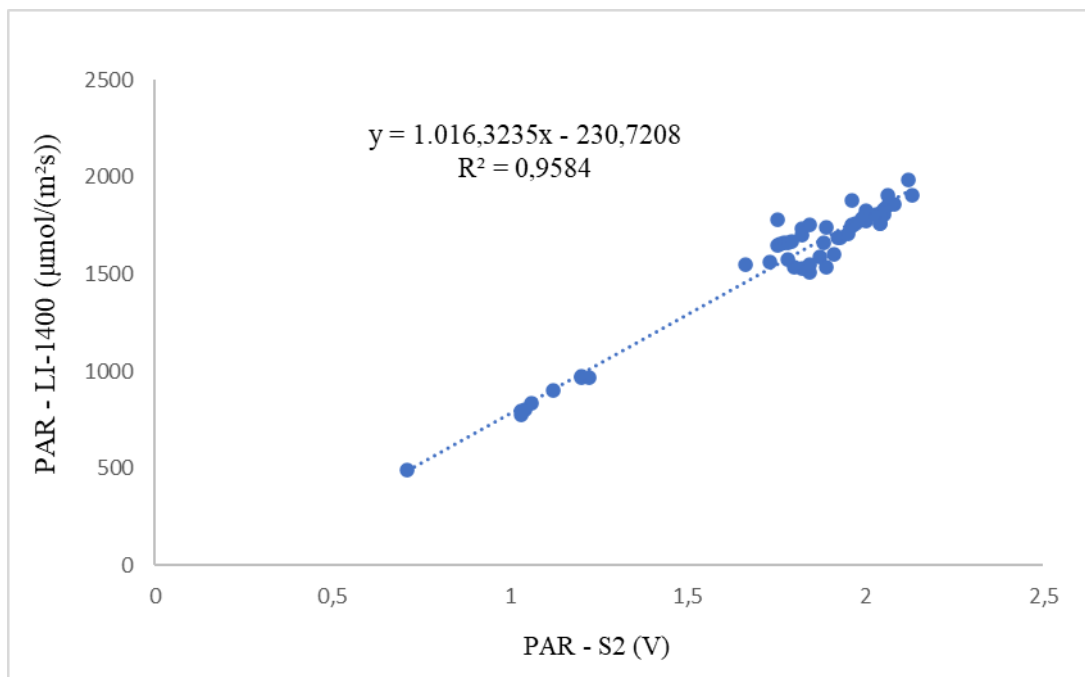
Fonte: Autores.

Para a curva de calibração do sistema 2, gerada para valores maiores que 0,60V (Figura 10A) obteve-se um intercepto no valor de 230,7208, um coeficiente angular de 1016,3235 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9584. A curva de calibração para valores menores que 0,60V (Figura 10B) apresentou um intercepto no valor de 221,9027, um coeficiente angular de 893,5531 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9391. Portanto, para ambos os sistemas,

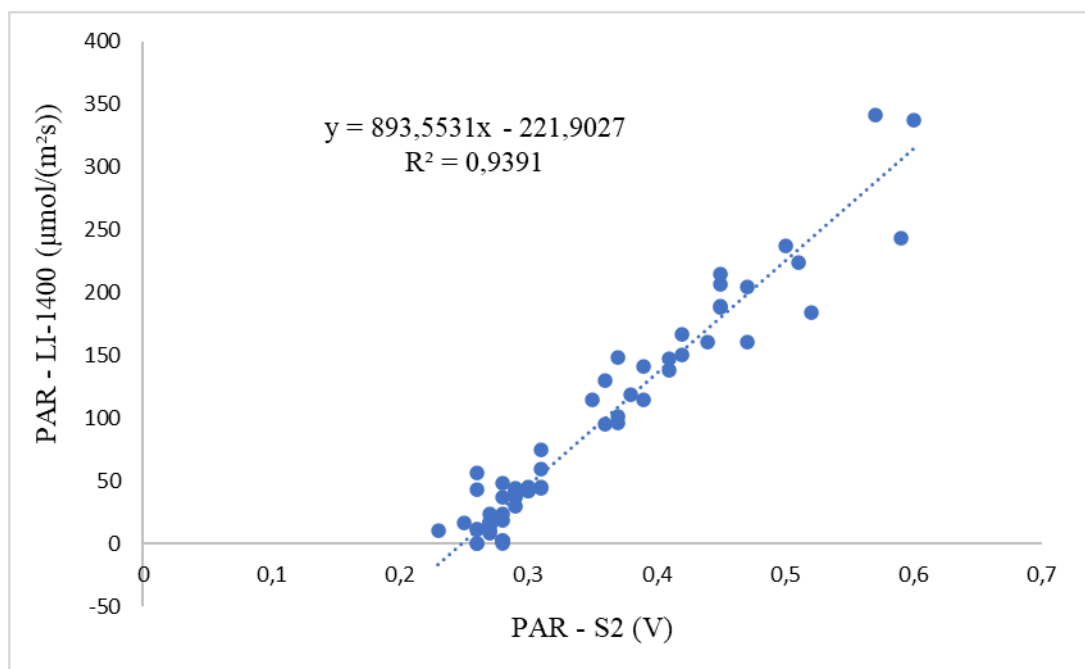
as curvas foram adequadas para corrigir os dados informados pelo sensor dos sistemas a partir dos dados do sensor de referência. Além disso, para os sensores de ambos os sistemas (S1 e S2), a estratégia de divisão dos dados em dois grupos permitiu a obtenção de equações de calibrações que melhor descreveram a relação entre a tensão gerada e a radiação fotossinteticamente ativa.

Figura 10 – Curva e equação de calibração do sensor de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) para valores maiores (A) e menores (B) que 0,60 (V) do Sistema 2 (S2)

(A)



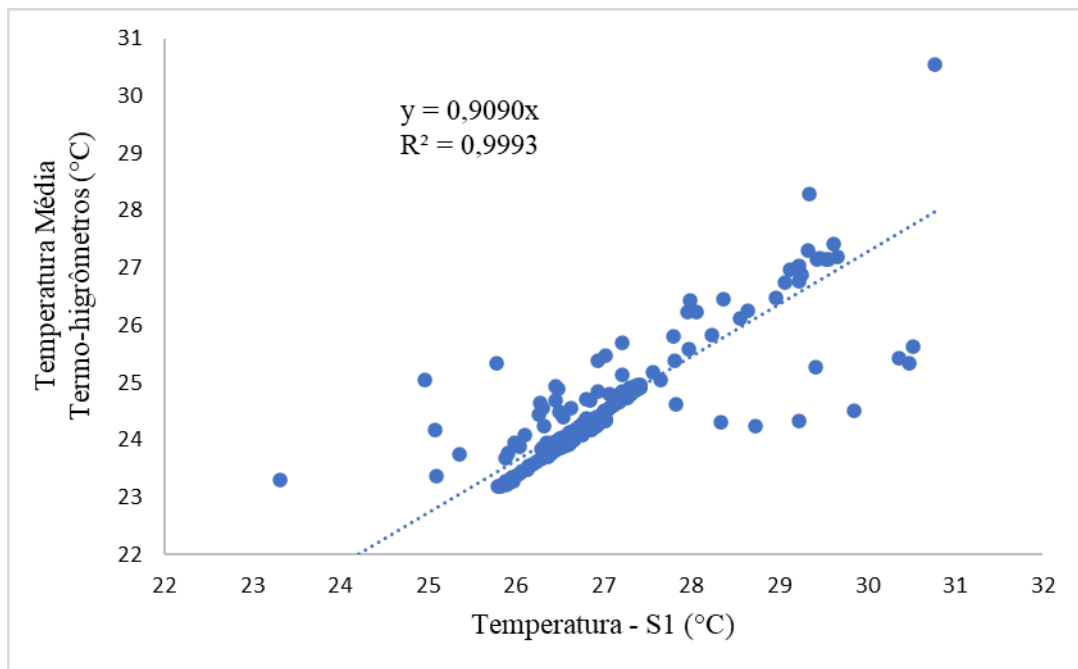
(B)



Fonte: Autores.

Na Figura 11 é apresentada a curva e equação de calibração do sensor de temperatura do ar, BME 280, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). A curva de calibração gerada apresentou um intercepto igual a zero, um coeficiente angular de 0,9090 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9993.

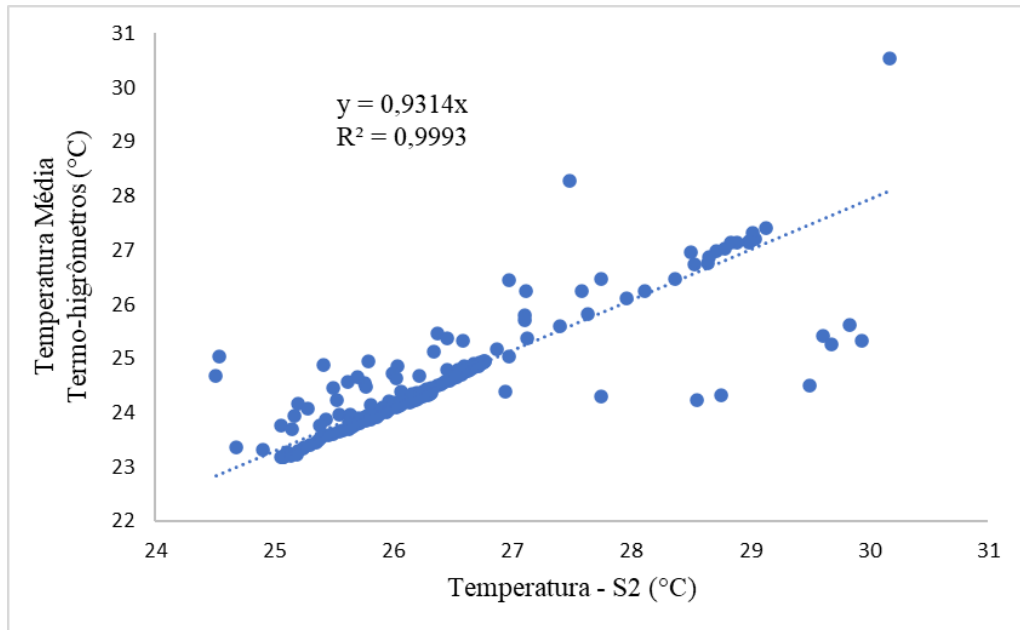
Figura 11 – Curva e equação de calibração do sensor de temperatura do ar do Sistema 1 (S1)



Fonte: Autores.

Para o sensor de temperatura do sistema S2 (Figura 12), a curva de calibração gerada apresentou um intercepto igual a zero, um coeficiente angular de 0,9314 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9993. Para ambos os sistemas as equações foram adequadas para corrigir os dados informados pelo sensor dos sistemas a partir dos dados do sensor de referência, visto que a equação obtida por regressão é capaz de descrever o desvio do valor de temperatura informados pelos sensores em relação à referência.

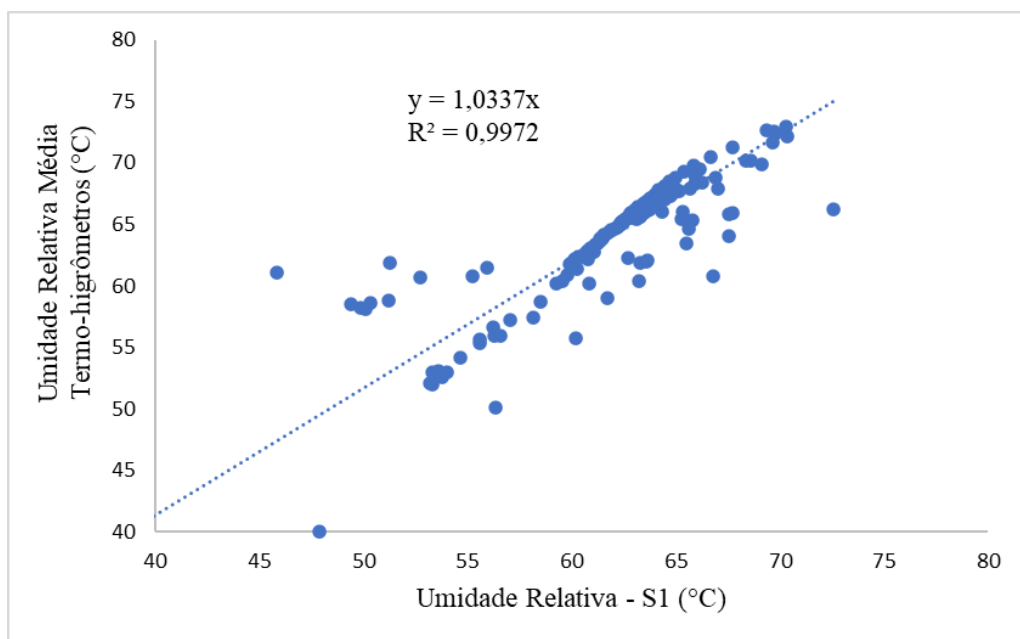
Figura 12 – Curva e equação de calibração do sensor de temperatura do ar do Sistema 2 (S2)



Fonte: Autores.

Na Figura 13 é apresentada a curva e equação de calibração do sensor de umidade relativa do ar, BME 280, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). A curva de calibração gerada apresentou um intercepto igual a zero, um coeficiente angular de 1,0337 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9972.

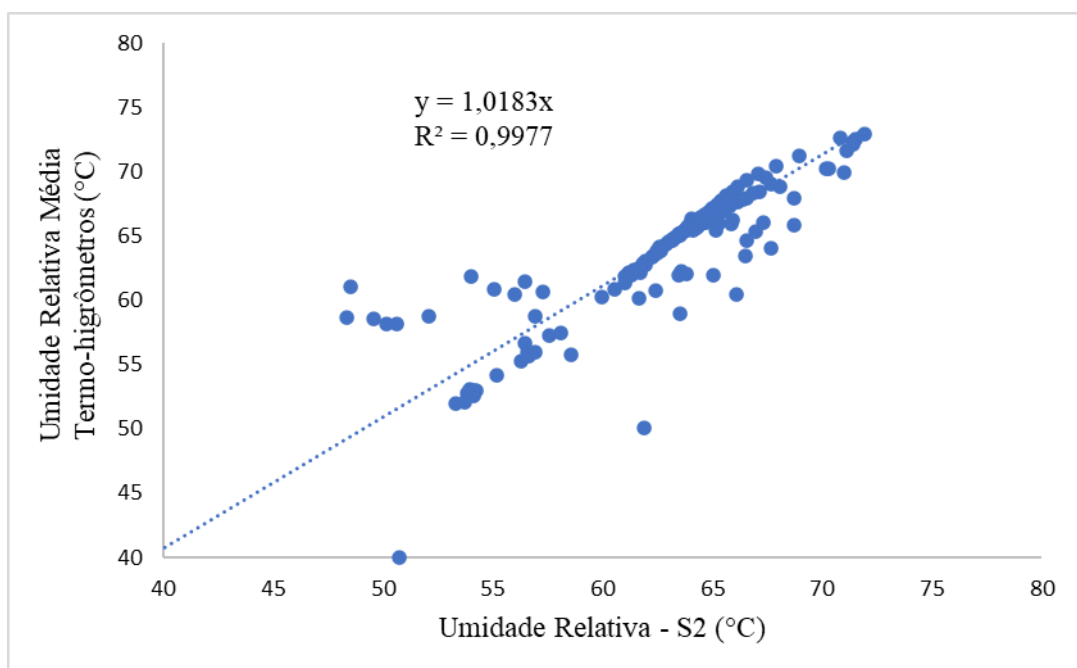
Figura 13 – Curva e equação de calibração do sensor de umidade relativa do ar Sistema 1 (S1)



Fonte: Autores.

A curva de calibração gerada para o sensor de umidade do S2 (Figura 14), apresentou um intercepto igual a zero, um coeficiente angular de 1,0183 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9977. Novamente, para ambos os sistemas as equações de calibração geradas foram adequadas para corrigir os dados informados pelo sensor dos sistemas a partir dos dados do sensor de referência.

Figura 14 – Curva e equação de calibração do sensor de umidade relativa do ar do Sistema 2 (S2)

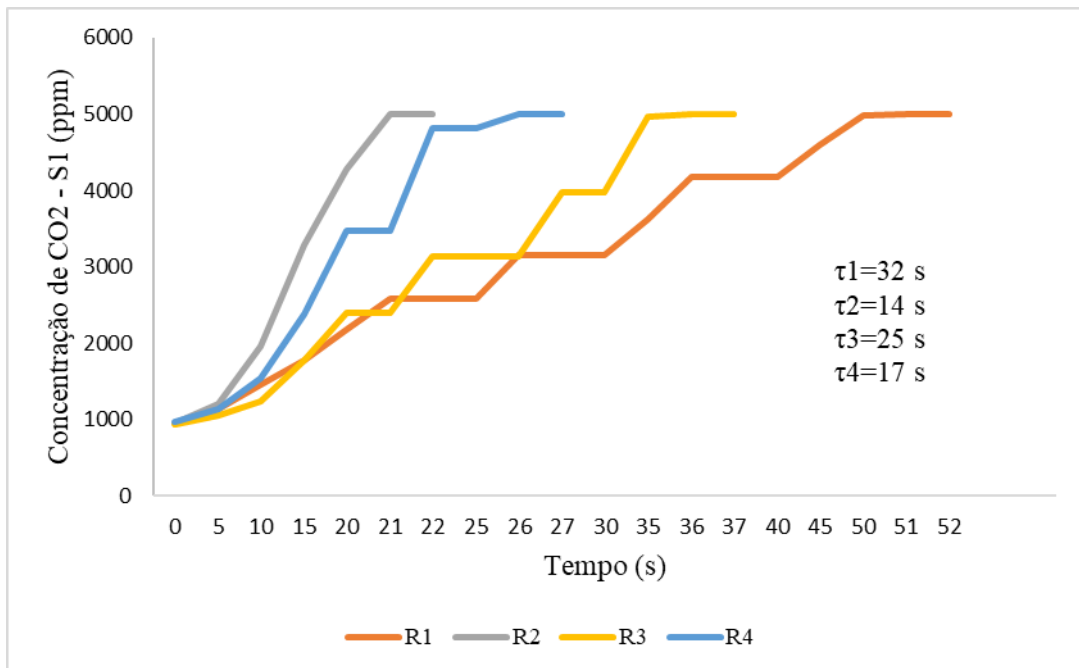


Fonte: Autores.

### 3.2 Curva do tempo de resposta, tempo de resposta e constante de tempo

Na Figura 15 é apresentada a curva do tempo de resposta do sensor de  $CO_2$ , MHZ-19B, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). Foi possível observar que o valor máximo atingido pelo sensor foi de 5000ppm, correspondendo ao valor de saturação. A constante de tempo ( $\tau$ ) correspondeu a 63,2% do valor da estabilização. Assim, obteve-se para a repetição 1 constante de tempo de 32s, para a repetição 2 14s, para a repetição 3 26s e para a repetição 4 17s. A constante de tempo média foi de 22,3s. Já o tempo de resposta correspondeu a 90% do valor da estabilização, obtendo-se para a repetição 1 44s, para a repetição 2 21s, para a repetição 3 33s e para a repetição 4 22s, representando tempo de resposta médio de 30s.

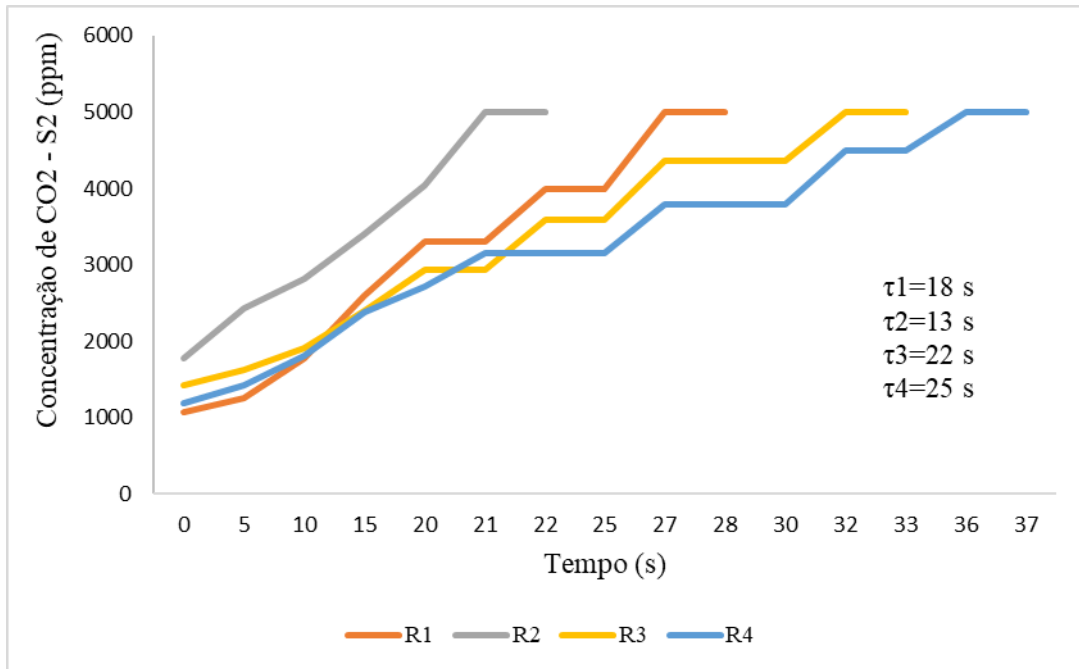
Figura 15 – Curva do tempo de resposta ( $\tau$ ) do sensor de CO<sub>2</sub> do sistema 1 (S1)



Fonte: Autores.

Para o sistema desenvolvido 2 (S2) (Figura 16), foi possível observar que o valor máximo atingido pelo sensor é de 5000 ppm, correspondendo ao valor de saturação. Para a repetição 1 observou-se constante de tempo 18s, para a repetição 2 13 s, para a repetição 2 22s e para a repetição 4 25s, sendo a constante de tempo média de 19,5s. Além disso, obteve-se para a repetição 1 tempo de resposta 26s, para a repetição 2 20s, para a repetição 3 31s e para a repetição 4 32s, resultando em tempo de resposta médio de 27,3s. O tempo de resposta informado pelo fabricante (WINSEN, 2016) do sensor é inferior a 120s. Para os sensores de ambos os sistemas desenvolvidos, o valor obtido no presente trabalho foi coerente com a especificação no manual do sensor.

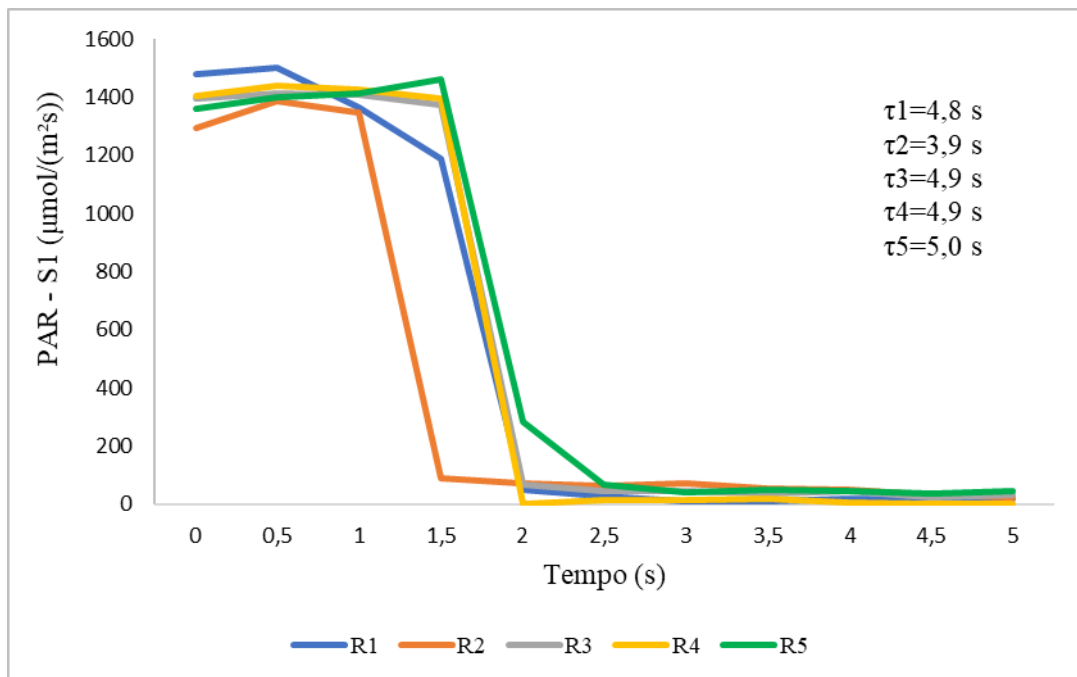
Figura 16 – Curva do tempo de resposta ( $\tau$ ) do sensor de CO2 do sistema 2 (S2)



Fonte: Autores.

Na Figura 17 é apresentada a curva do tempo de resposta do sensor de PAR, RY-GH, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). Foi possível observar que o valor máximo atingido pelo sensor é de aproximadamente 1500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ . Por se tratar de estabilização com redução do valor de radiação, a constante de tempo ( $\tau$ ) correspondeu a 36,8% do valor da estabilização. Obteve-se para repetição 1 4,8s, para a repetição 2 3,9s, para a repetição 3 e 4 4,9s e para a repetição 5 5s, sendo a constante de tempo média de 4,7s. Para a para a repetição 1 obteve-se tempo de resposta 1s, para a repetição 2,3,4 e 5 1,5s sendo o tempo de resposta médio de 1,4s.

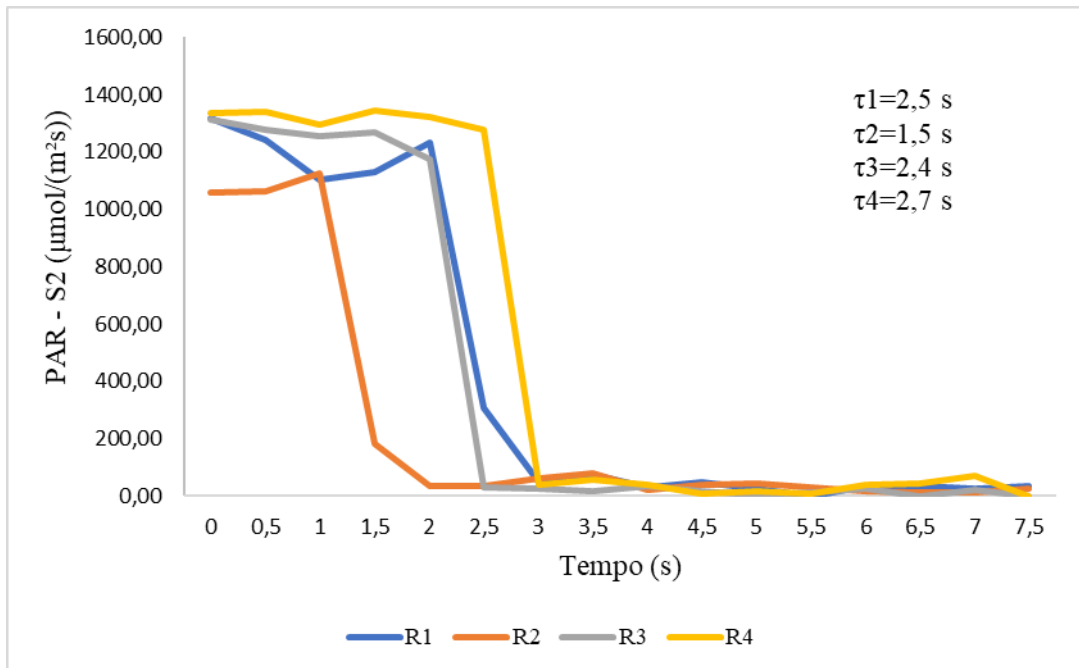
Figura 17 – Curva do tempo de resposta ( $\tau$ ) do sensor de radiação fotossinteticamente ativa do sistema 1 (S1)



Fonte: Autores.

De forma similar para o sistema desenvolvido 2 (S2) (Figura 18), foi possível observar que o valor máximo atingido pelo sensor foi de aproximadamente 1400 ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ). Para a repetição 1 obteve-se constante de tempo 2,5s, para a repetição 2 1,5s, para a repetição 3 2,4s e para a repetição 4 2,7s, sendo a constante de tempo média de 2,3s. Referente ao tempo de resposta, obteve-se para a repetição 1 1s, para a repetição 2 1,5s, para a repetição 3 1,7s e para a repetição 4 1,5s, sendo o tempo de resposta médio de 1,4s. Segundo o manual do fabricante, o tempo de resposta do sensor utilizando é de 1s (NONG-IOT, 2021). Para ambos os sistemas obteve-se o tempo de resposta próximo do esperado, ultrapassando em 0,4s.

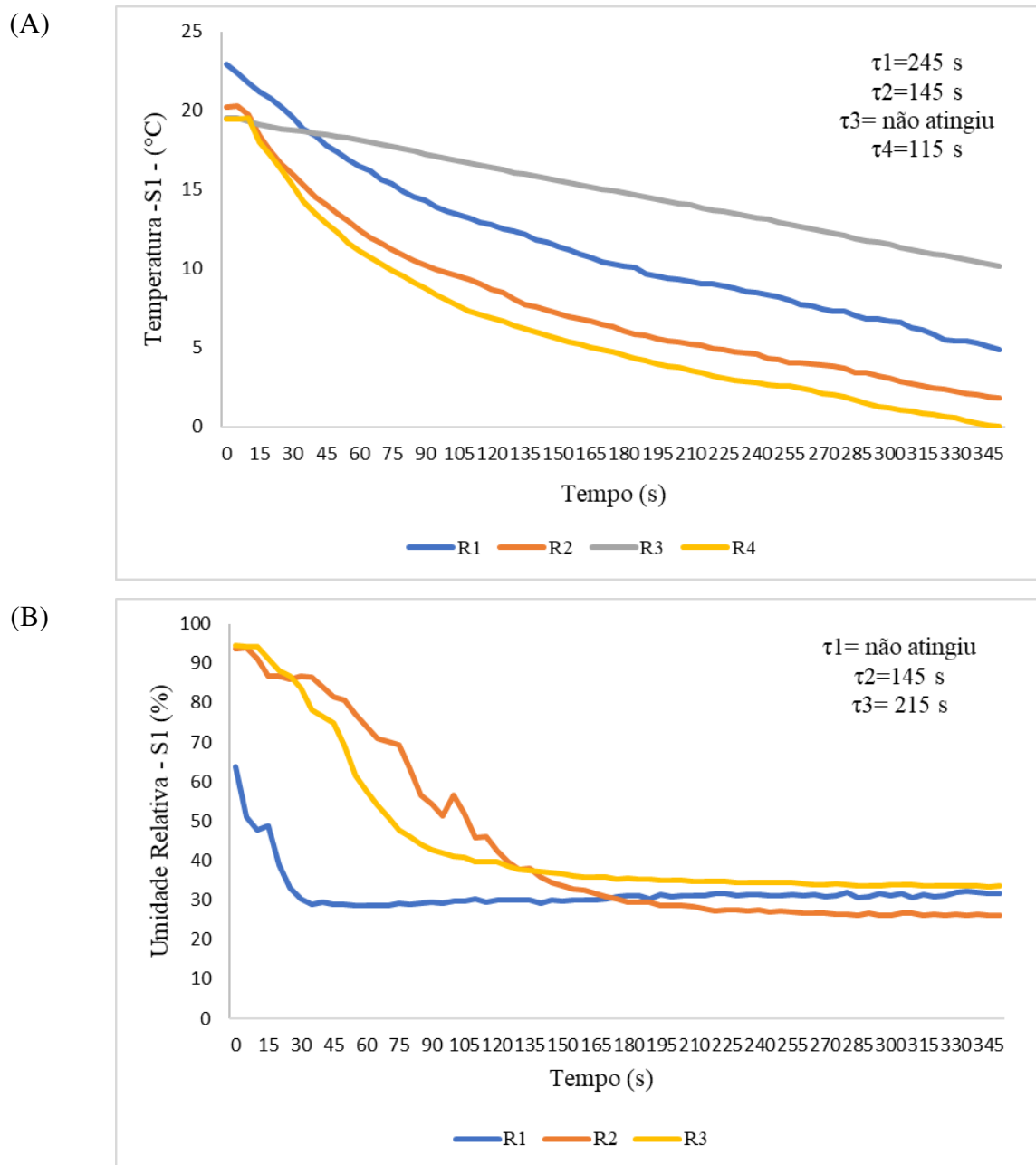
Figura 18 – Curva do tempo de resposta ( $\tau$ ) do sensor de radiação fotossinteticamente ativa do sistema 2 (S2)



Fonte: Autores.

Na Figura 19 A é apresentada a curva do tempo de resposta do da temperatura do ar, do sensor BME 280, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). Referente à constante de tempo, obteve-se para a repetição 1 245s, para a repetição 2 145s e para a repetição 4 115s, e valor média 168s. Na repetição 3 o sensor não atingiu 36,8% do valor da estabilização. O tempo de resposta, que correspondeu a 90% do valor da estabilização, foi para a repetição 1 20s, para a repetição 2 15s, para a repetição 3 80s e para a repetição 4 20s, sendo o tempo de resposta médio de 34s. Já na Figura 19 B é apresentado a curva do tempo de resposta para a umidade relativa do ar, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). É possível observar que para a contante de tempo ( $\tau$ ), na repetição 2 foi obtido um tempo de 145 s e para a 3 de 215s, sendo a constante média de 180s. Na repetição 3 o sensor não atingiu 36,8% do valor da estabilização. Já para o tempo de resposta, na repetição 1 foi obtido o tempo de 5s, para a 2 40s, para a 3 30s, sendo o tempo de resposta médio de 25s.

Figura 19 – Curva do tempo de resposta ( $\tau$ ) do sensor de temperatura (A) e umidade relativa (B) do ar do sistema 1 (S1)



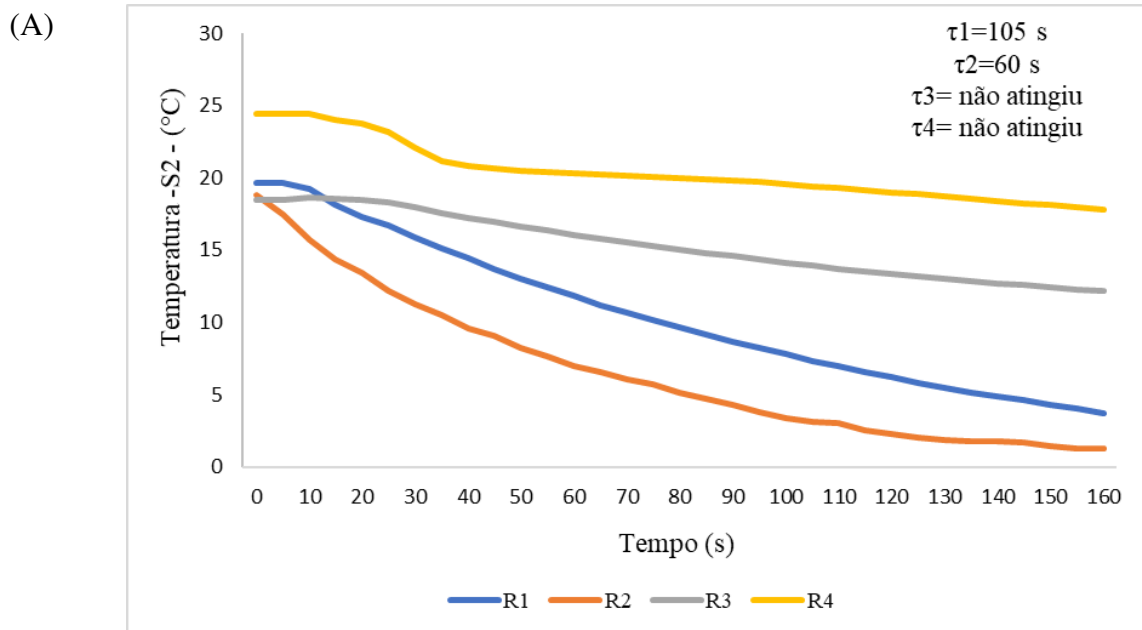
Fonte: Autores.

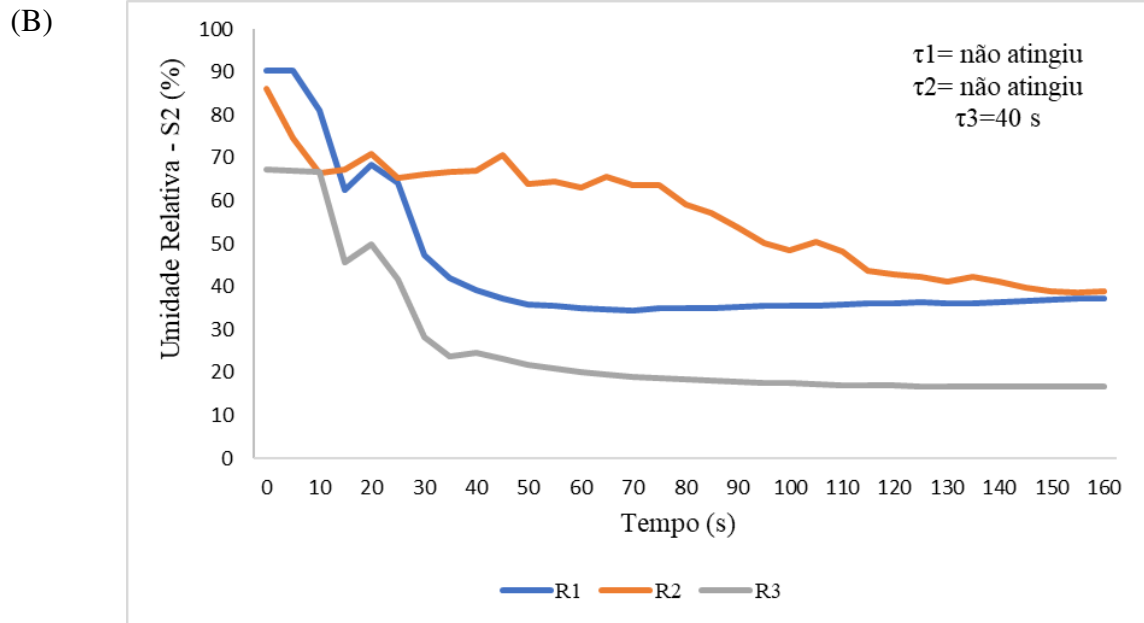
De forma similar, para o sensor de temperatura do ar do sistema desenvolvido 2 (S2) (Figura 20 A), foi possível observar que para constante de tempo na repetição 1 foi obtido um tempo de 105s e para a repetição 2 60s, sendo a constante de tempo média de 83s. Na repetição 3 e 4 o sensor não atingiu os 36,8% do valor da estabilização. Referente ao tempo de resposta, para repetição 1 foi obtido um tempo de 20s, para a repetição 2 10s, para a repetição 3 50s e para a repetição 4 30s, sendo o tempo de resposta médio de 28s. Já para a umidade relativa do

ar do sistema 2 (Figura 20 B), foi obtido para a constante de tempo na repetição 3 um tempo de 40s. Na repetição 1 e 2 o sensor não atingiu os 36,8% do valor da estabilização. Referente ao tempo de resposta, foi obtido para a repetição 1 um tempo de 10s, para a repetição 2 5s e para a repetição 3 10s, sendo o tempo de resposta médio de 8s.

O tempo de resposta do sensor BME280, informando pelo fabricante, é de 1s (BOSCH, 2014), portanto pode-se perceber que o valor encontrado foi maior para ambas as variáveis nos dois sistemas. Tempo de resposta superior ao informado pelo fabricante significa que o sistema desenvolvido com o BME 280 não é capaz de detectar, de forma precisa, oscilações bruscas de temperatura e umidade (variação de  $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e/ou  $\pm 50\%$  em intervalo de tempo inferior a 8s). Contudo, essa situação não ocorrerá em casas de vegetação.

Figura 20 – Curva do tempo de resposta ( $\tau$ ) do sensor de temperatura (A) e umidade relativa (B) do ar do sistema 2 (S2)





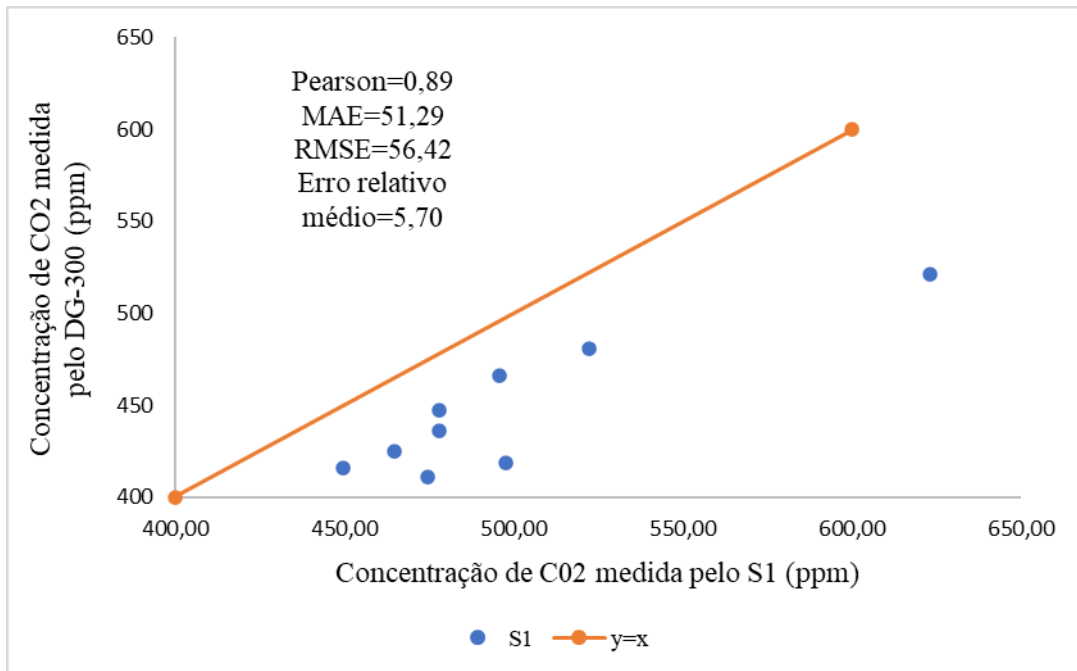
Fonte: Autores.

### 3.3 Validação dos sistemas de monitoramento agrometeorológico

#### 3.3.1 Validação em relação aos sensores de referência

Na Figura 21 é apresentada a validação do sensor de CO<sub>2</sub>, MH-Z19B, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). Observou-se que o valor máximo atingido pelo sensor do sistema foi 620ppm. Além disso, o coeficiente de Pearson foi igual a 0,89, o MAE foi 51,29, o RMSE foi 56,42 e o erro relativo médio foi 5,70. Como o coeficiente de Pearson foi próximo 1, concluiu-se que os valores medidos pelo DG-300 e pelo S1 têm uma correlação positiva entre si. De acordo com o MAE o sensor pode estar errando  $\pm 51,29$  ppm, e o RMSE  $\pm 56,42$ ppm. Além disso, a partir do erro relativo médio, observou-se que o sensor está diferente do correto na média 5,70.

Figura 21 – Validação do sensor de CO<sub>2</sub> do sistema 1 (S1) a partir do sensor de referência DG-300

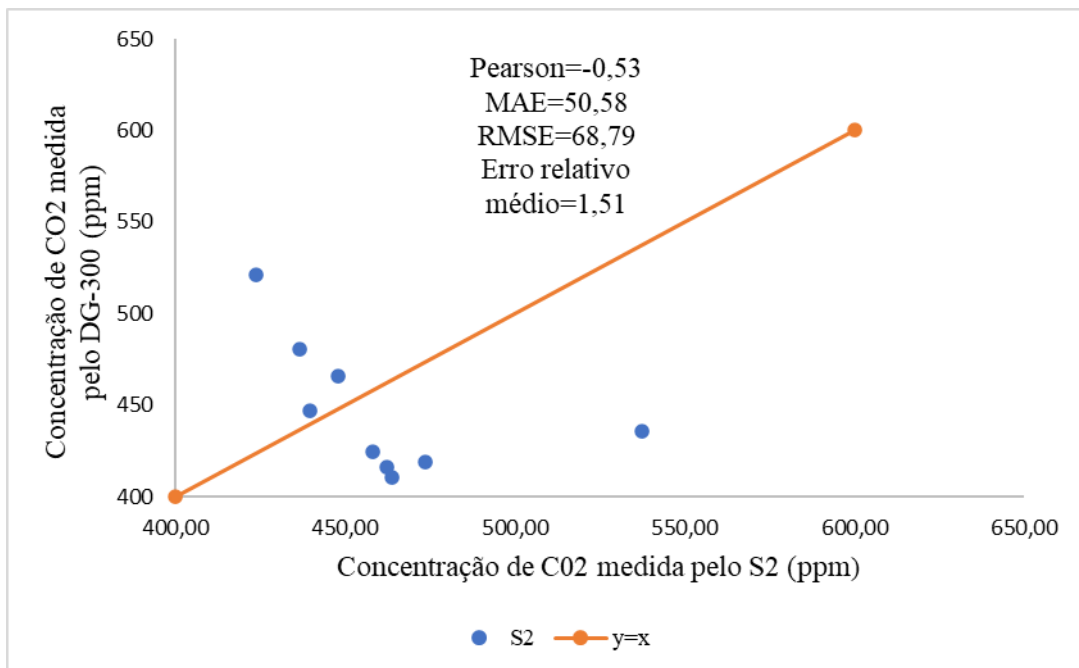


Fonte: Autores.

Para o sistema 2 (Figura 22), o valor máximo atingido pelo sensor foi de aproximadamente 540ppm. Além disso, o coeficiente de Pearson foi igual a -0,53, o MAE foi igual a 50,58, o RMSE foi igual a 68,79 e o erro relativo médio foi igual a 1,51. Como o coeficiente de Pearson está mais próximo de -1, podemos concluir que os valores medidos pelo DG-300 e pelo S1 têm uma correlação negativa entre si. De acordo com o MAE o sensor pode estar errando  $\pm 50,58$ ppm e o RMSE  $\pm 68,79$ ppm. Além disso, a partir do erro relativo médio é possível observar que o sensor está diferente do correto na média 1,51ppm.

Para ambos os sistemas, os erros apresentados pelos sensores, podem ter ocorrido devido a precisão do sensor utilizando no sistema e do sensor de referência. O datasheet do sensor MH-Z19B (WINSEN, 2016) informou que a precisão é de 50ppm  $\pm 3\%$  da leitura e do sensor de referência (INSTRUTHERM, 2022) é de 75ppm  $\pm 5\%$  da leitura, ou seja, o sensor de referência é menos preciso, e pode-se dizer que são duas fontes de erro.

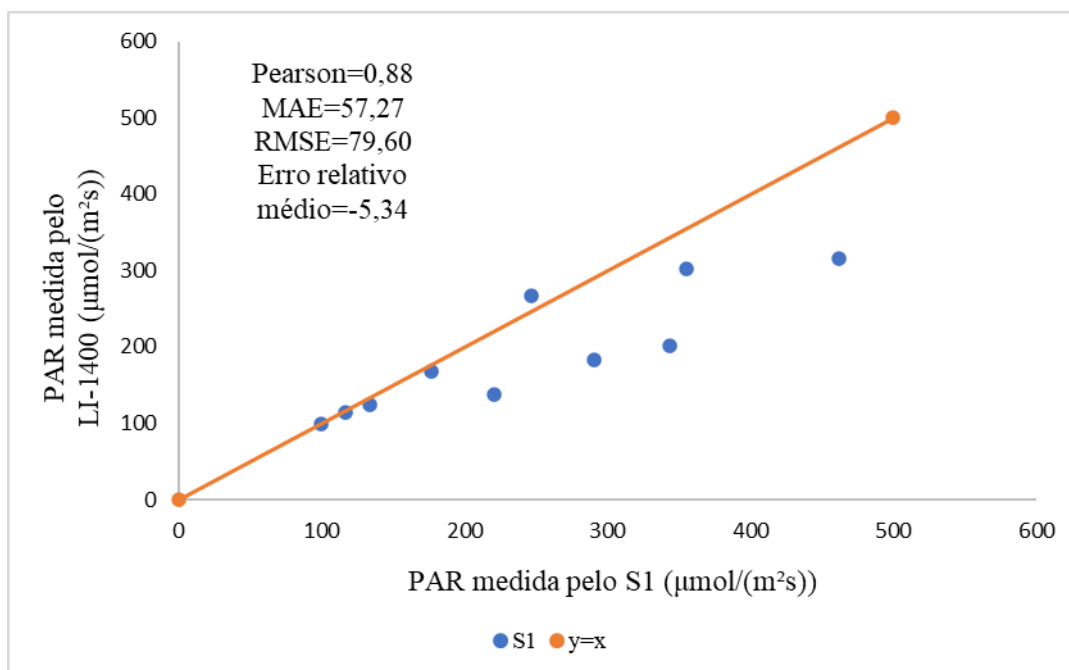
Figura 22 – Validação do sensor de CO<sub>2</sub> do sistema 2 (S2) a partir do sensor de referência DG-300



Fonte: Autores.

Na Figura 23 é apresentada a validação do sensor de PAR, RY-GH, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). Observou-se que o valor máximo atingido pelo sensor do sistema S2 é de aproximadamente 540  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ . Além disso, o coeficiente de Pearson foi igual a 0,88, o MAE foi igual a 57,27, o RMSE foi igual a 79,60 e o erro relativo médio foi igual a -5,34. Como o coeficiente de Pearson foi próximo de 1, concluiu-se que os valores medidos pelo DG-300 e pelo S1 têm uma correlação positiva entre si. De acordo com o MAE o sensor pode estar errando  $\pm 57,27 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$  e o RMSE  $\pm 79,60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ . Além disso, a partir do erro relativo médio, observou-se que o sensor foi diferente do valor de referência, na média,  $-5,34 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ .

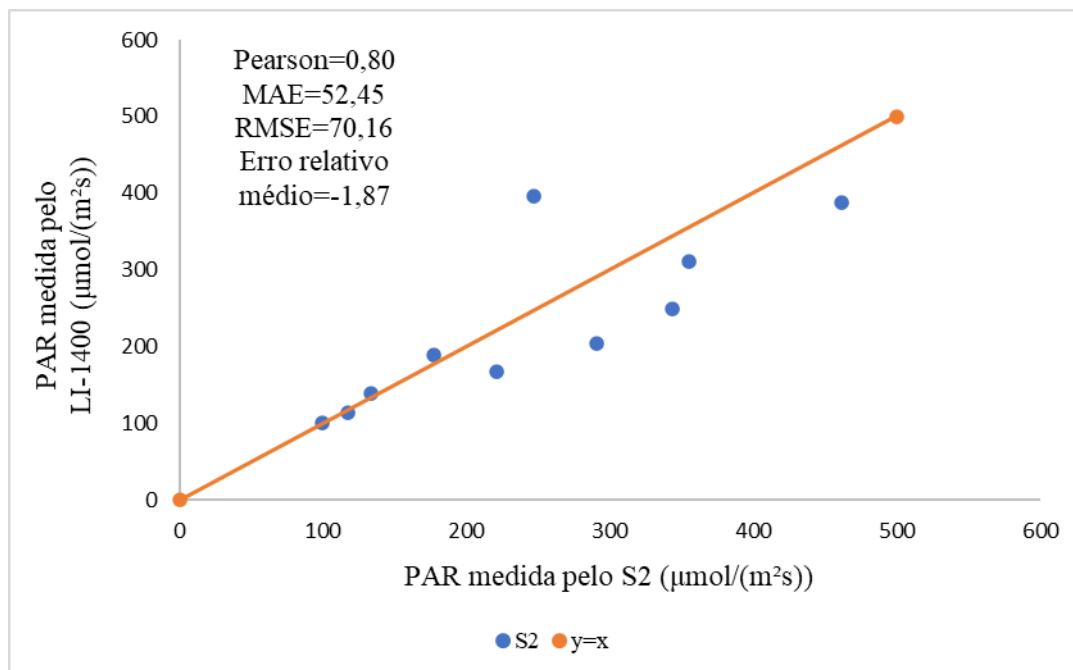
Figura 23 – Validação do sensor PAR do sistema 1 (S1) , a partir do sensor de referência



Fonte: Autores.

Para o sistema 2 (Figura 24), observou-se que o valor máximo atingido pelo sensor do sistema S2 foi de aproximadamente  $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ . Além disso, o coeficiente de Pearson foi igual a 0,80, o MAE foi igual a 52,45, o RMSE foi igual a 70,16 e o erro relativo médio foi igual a -1,87. Como o coeficiente de Pearson foi próximo 1, concluiu-se que os valores medidos pelo DG-300 e pelo S1 têm uma correlação positiva entre si. De acordo com o MAE o sensor pode estar errando  $\pm 52,45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$  e o RMSE  $\pm 70,16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ . Além disso, a partir do erro relativo médio observou-se que o sensor estava diferente do valor de referência, na média,  $-1,87 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ . Para ambos os sistemas, os erros apresentados pelos sensores, podem ter ocorrido devido às sujeiras presentes na lona que cobriu a casa de vegetação.

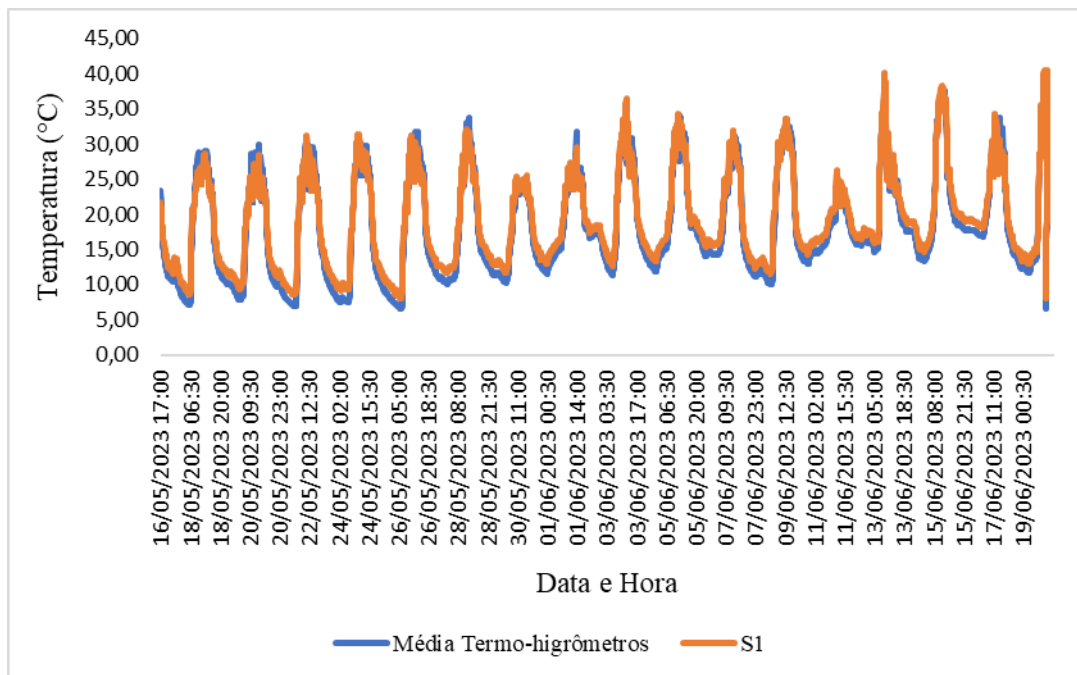
Figura 24 – Validação do sensor PAR do sistema 2 (S2), a partir do sensor de referência



Fonte: Autores.

Na Figura 25 é apresentada a validação do sensor de temperatura do ar, BME 280, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). Observou-se que valor máximo atingido pelo sensor do sistema S2 foi de aproximadamente 40 °C. Além disso, o coeficiente de Pearson foi igual a 0,99, o MAE foi igual a 1,31, o RMSE foi igual a 1,43 e o erro relativo médio foi igual a -0,0004. Como o coeficiente de Pearson ficou próximo de 1, conclui-se que os valores medidos pelo DG-300 e pelo S1 têm uma correlação positiva entre si. No entanto, de acordo com o MAE o sensor pode estar errando  $\pm 1,31$  °C e o RMSE  $\pm 1,43$  °C. Além disso, a partir do erro relativo médio, observou-se que o sensor está diferente do valor de referência, na média, -0,0004 °C.

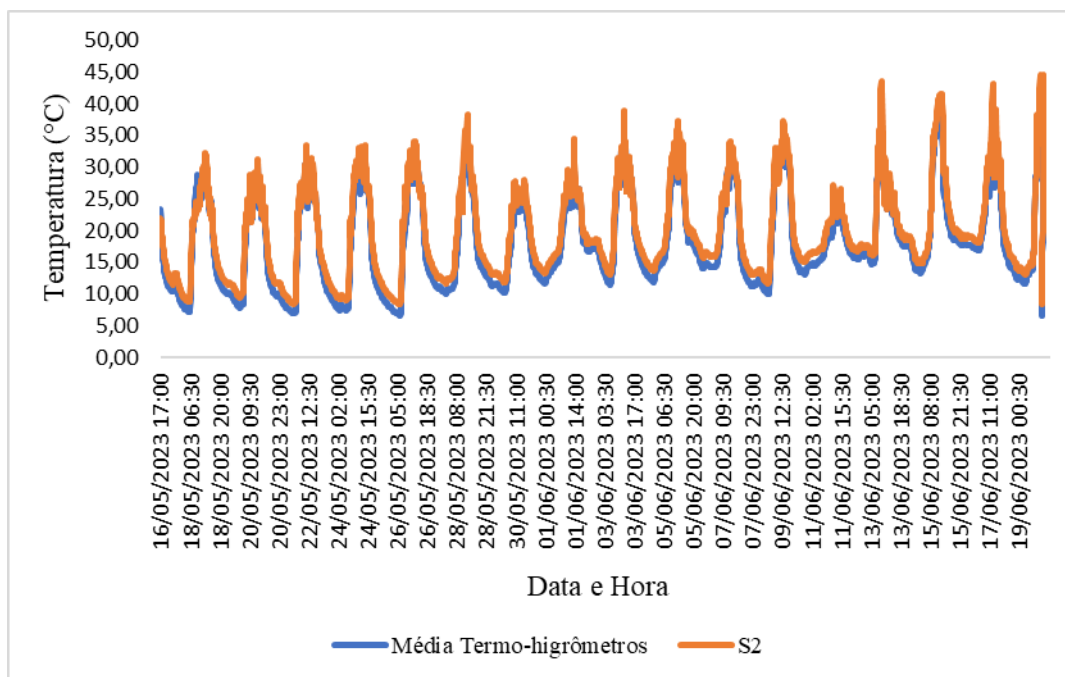
Figura 25 – Validação do sensor de temperatura do ar do sistema 1 (S1), a partir do sensor de referência



Fonte: Autores.

Para o sistema 2 (Figura 26), observou-se que o valor máximo atingido pelo sensor foi aproximadamente 45 °C. Além disso, o coeficiente de Pearson foi 0,98, o MAE 1,75, o RMSE 1,94 e o erro relativo médio -0,0007. Como o coeficiente de Pearson foi próximo de 1, concluiu-se que os valores medidos pelo DG-300 e pelo S1 têm uma correlação positiva entre si. De acordo com o MAE o sensor pode estar errando  $\pm 1,75$  °C e o RMSE  $\pm 1,94$  °C pra mais ou para menos. Além disso, a partir do erro relativo médio observou-se que o sensor está diferente do valor de referência, na média, -0,0007. Para ambos os sistemas, os erros apresentados pelos sensores foram considerados aceitáveis para a referida aplicação.

Figura 26 – Validação do sensor de temperatura do ar do sistema 2 (S2), a partir do sensor de referência



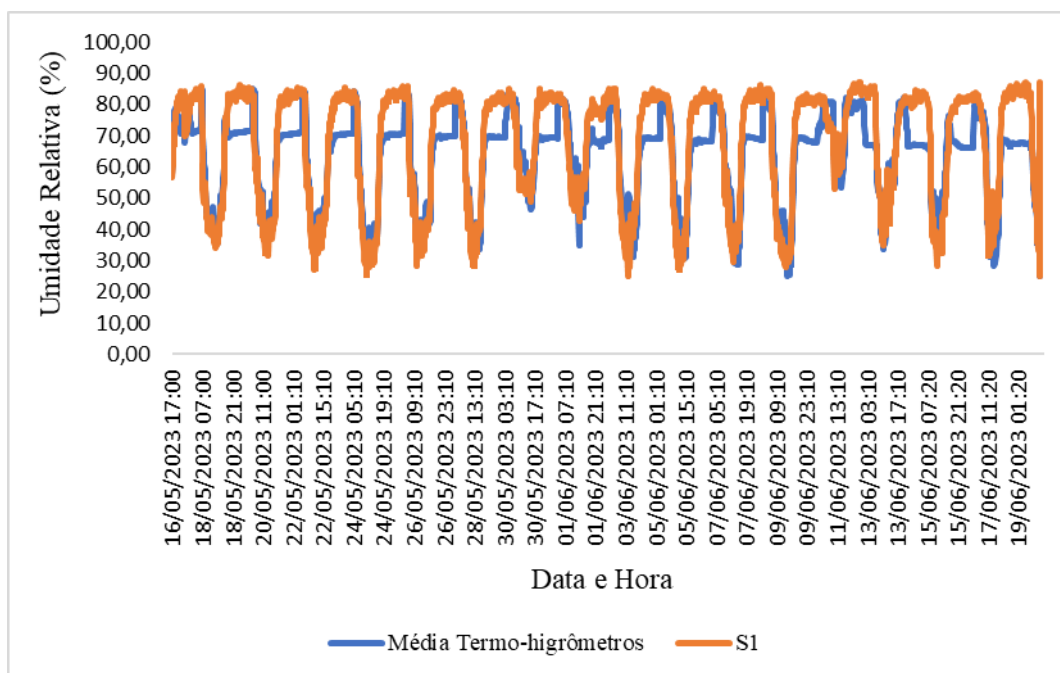
Fonte: Autores.

Para os resultados de temperatura do ar (Figura 25 e 26) observou-se que ambos os sistemas apresentaram um comportamento similar ao dos valores médios dos termo-higrômetros. Os dois sistemas apresentaram valores ligeiramente superiores, isso pode ter ocorrido devido a terem sido utilizado mais termo-higrômetros na validação (para garantir medir a temperatura de uma maior área) e eles serem diferentes dos que foram utilizados na calibração. Além disso, ambos apresentam uma forte correlação, a partir da correlação de Pearson, concluindo-se que o sensor BME 280 foi preciso e confiável. Por fim, pode-se dizer que para o monitoramento de casas de vegetação, erros inferiores a 2°C são aceitáveis. Em sistemas que necessitem de maior precisão no monitoramento agrometeorológico, é recomendável a utilização de sensores com a precisão necessária.

Na Figura 27 é apresentada a validação do sensor de umidade relativa do ar, BME 280, contido no sistema desenvolvido 1 (S1). Observou-se que valor máximo atingido pelo sensor do sistema S2 foi aproximadamente 90%. Além disso, o coeficiente de Pearson foi 0,90, o MAE foi 8,40, o RMSE foi 9,70 e o erro relativo médio foi -0,002. Como o coeficiente de Pearson ficou próximo 1, podemos concluir que os valores medidos pelo DG-300 e pelo S1 têm uma correlação positiva entre si. De acordo com o MAE o sensor pode estar errando  $\pm 8,40\%$  e o

RMSE  $\pm$  9,70%. Além disso, a partir do erro relativo médio, o sensor divergiu do valor de referência, na média, -0,002%.

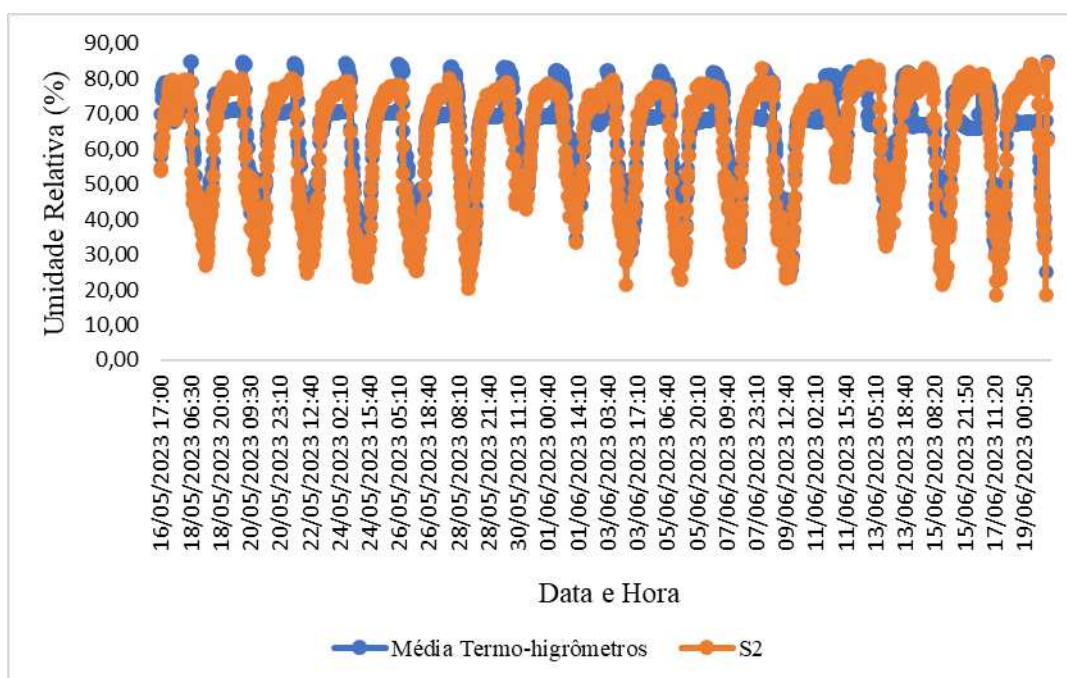
Figura 27 – Validação do sensor de umidade relativa do ar do sistema 1 (S1), a partir do sensor de referência



Fonte: Autores.

Para o sistema 2 (Figura 28), observou-se que o valor máximo atingido pelo sensor é de aproximadamente 90%. Além disso, o coeficiente de Pearson foi 0,90, o MAE 6,66, o RMSE 7,87 e o erro relativo médio 0,0002. Como o coeficiente de Pearson ficou próximo 1, concluiu-se que valores medidos pelo DG-300 e pelo S1 têm uma correlação positiva entre si. De acordo com o MAE o sensor pode estar errando  $\pm$  6,66% e o RMSE  $\pm$  7,87%. Além disso, a partir do erro relativo médio, o sensor divergiu do sensor de referência, na média, -0,0002 %. Para ambos os sistemas, os erros apresentados pelos sensores são considerados aceitáveis para a aplicação, demonstrando a aplicabilidade de sensores de baixo custo para desenvolvimento de sistemas destinados ao monitoramento de variáveis agrometeorológicas.

Figura 28 – Validação do sensor de umidade relativa do ar do sistema 2 (S2), a partir do sensor de referência

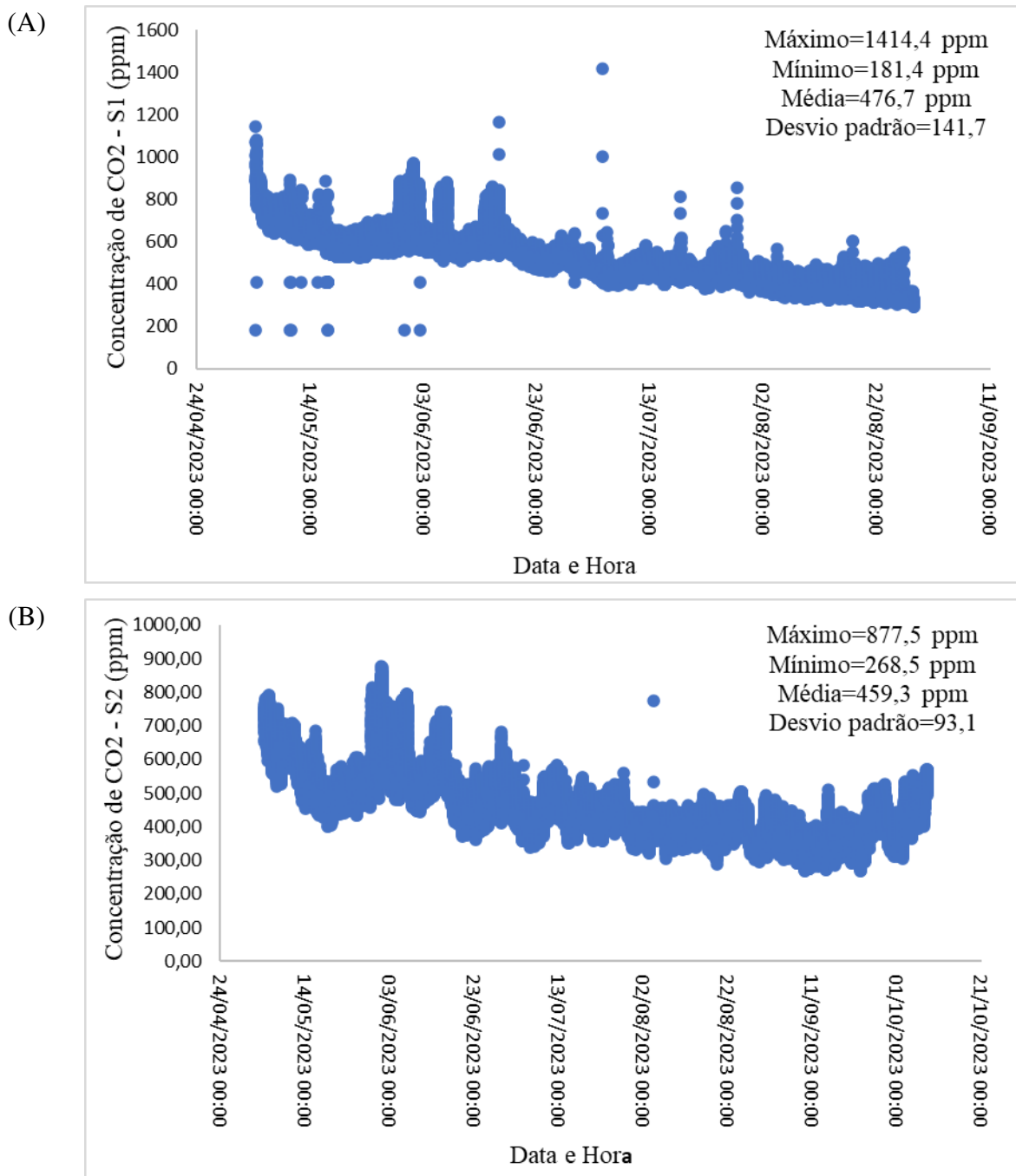


Fonte: Autores.

### 3.3.2 Validação em relação ao funcionamento do sistema

Na Figura 29 A é apresentado os valores medidos pelo sensor de CO<sub>2</sub>, MHZ-19B, contido nos sistemas desenvolvidos 1 e 2 (S1 e S2), durante os 158 dias de validação de funcionamento do sistema. O valor máximo atingido pelo sensor foi 1414,4ppm, o valor mínimo 181,4ppm, a média 476,7ppm e o desvio padrão 141,7. Já para o sistema 2 (Figura 29 B), valor máximo foi 877,5ppm, o valor mínimo 268,5ppm, a média 459,3ppm e o desvio padrão 93,1. Além disso, observou-se concentração de CO<sub>2</sub> teve uma queda ao longo do tempo, devido à redução do fluxo de gás gerado pela compostagem utilizada para o enriquecimento do ambiente de produção do tomateiro.

Figura 29 – Variação da concentração do gás CO<sub>2</sub> do sistema 1 (A) e 2 (B) no período de avaliação de funcionamento do sistema desenvolvido

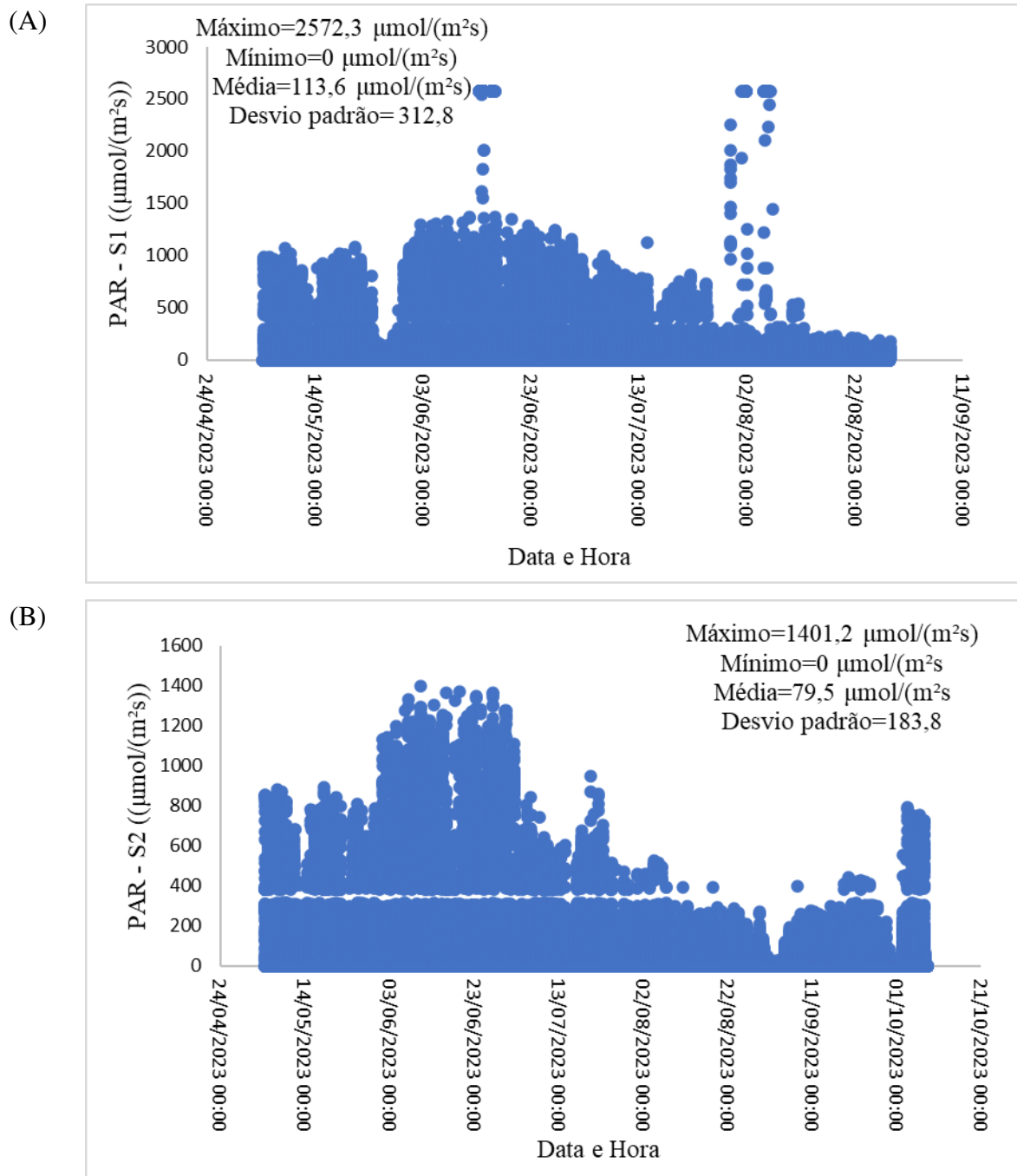


Fonte: Autores.

Já na Figura 30 A é apresentado os valores de PAR informados pelos sensores PAR, RY-GH, contido no sistema 1 e 2 (S1 e S2) durante o período de avaliação. O máximo informado pelo sensor foi 2572,3  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ , o valor mínimo 0  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ , a média 113,6  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$  e o desvio padrão 312,8. Para o sensor do sistema 2 (Figura 30 B), o valor máximo foi 1401,2 ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ), o valor mínimo 0 ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ), a média 79,5 ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ) e o desvio

padrão 183,8. A diferença na magnitude dos valores máximos e médios pode ser explicada devido à presença de sujidades em alguns pontos da cobertura da casa de vegetação, interferindo no valor medido pelos sensores de PAR.

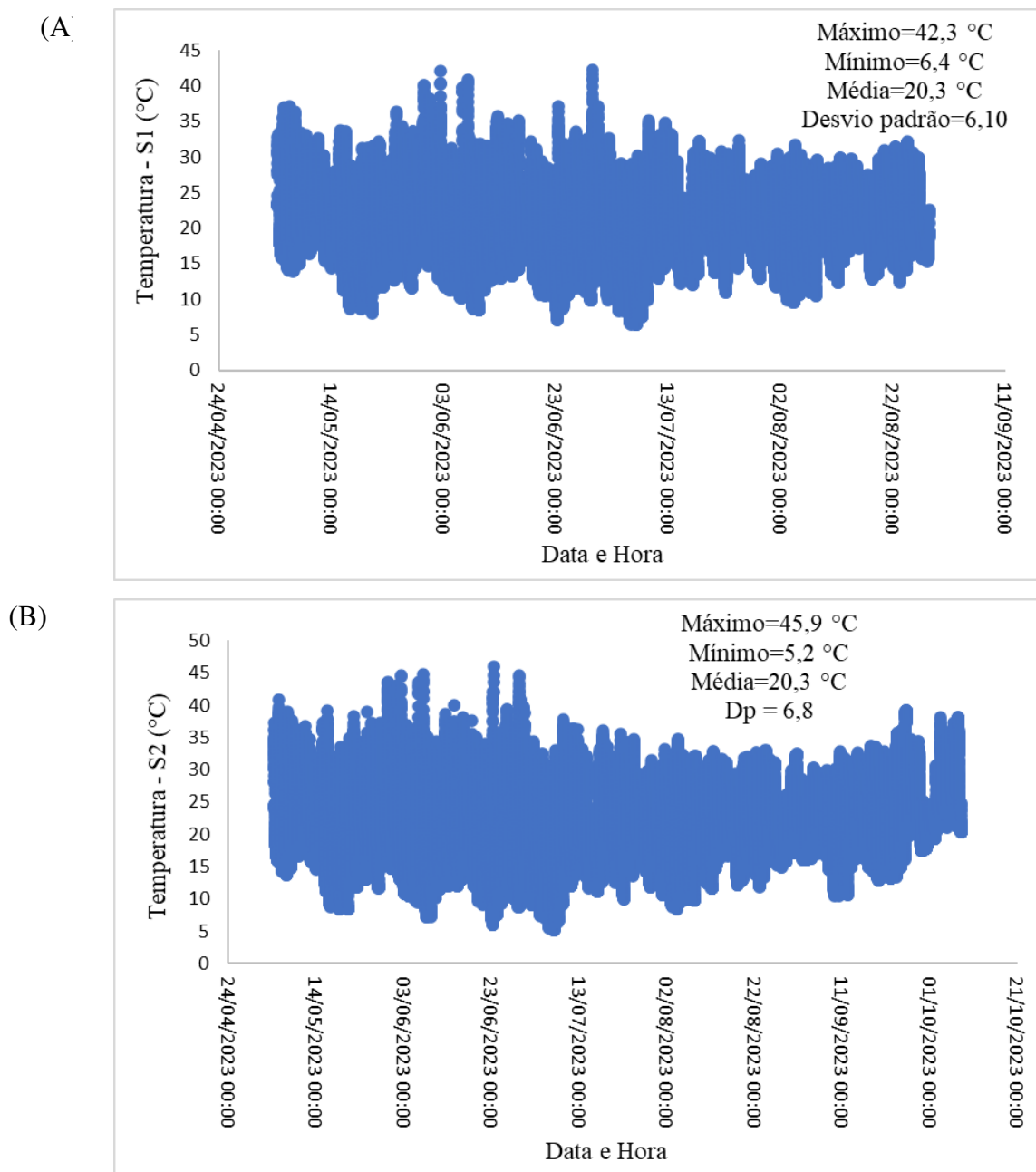
Figura 30 – Variação da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) informada pelos sensores contidos no sistema 1 (A) e 2 (B) durante o período de avaliação do sistema



Fonte: Autores.

Na Figura 31 (A e B) é apresentado a validação geral dos sensores de temperatura do ar, BME 280, contido nos sistemas 1 e 2 (S1 e S2). O valor máximo informado pelo sensor 1 foi 42,3°C, o valor mínimo é de 6,4°C, a média é de 20,3°C e o desvio padrão é 6,10 (Figura 31 A). Para o sensor 2 (Figura 31 B), observou-se valor máximo 45,9°C, valor mínimo 5,2°C, a média é de 20,3°C e o desvio padrão 6,80.

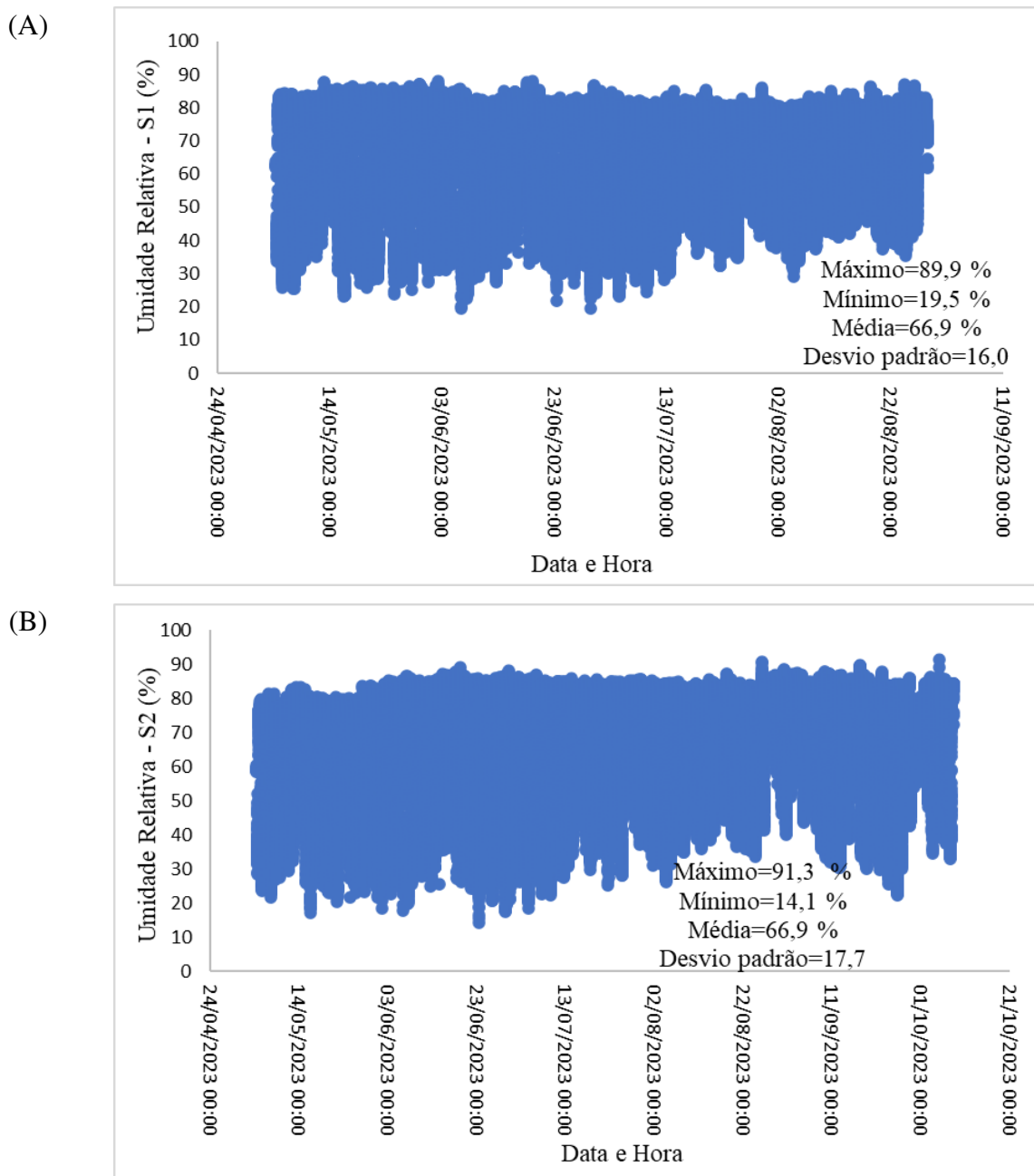
Figura 31 – Variação da temperatura informada pelos sensores BME280 contidos no sistema 1 (A) e 2 (B) durante o período de avaliação do sistema



Fonte: Autores.

Ao analisar a variação da umidade relativa do ar do interior da casa de vegetação ao longo de 158 dias, observou-se que o sensor BME do sistema 1 informou valor máximo 89%, valor mínimo 19,5%, média 66,9%, com desvio padrão é 16,0 (Figura 32 A). Para o sensor do sistema 2 (Figura 32 B), o máximo foi 91,3%, o valor mínimo 14,1%, a média 66,9%, com desvio padrão 17,7%.

Figura 32 – Variação da umidade relativa do ar informada pelos sensores BME280 contidos no sistema 1 (A) e 2 (B) durante o período de avaliação do sistema



Fonte: Autores.

De forma geral, observou-se que as variáveis agrometeorológicas monitoradas, radiação fotossinteticamente ativa, temperatura e umidade relativa do ar e gás CO<sub>2</sub>, apresentaram oscilações normais ao longo dos dias e ao longo dos meses. O sistema desenvolvido se mostrou confiável, mantendo-se em funcionamento durante 158 dias, sem travamento, sem ausência ou falha de dados e os sensores RY-GH, MH-Z19B e BME 280 responderam durante todo esse período.

Marques Filho *et al.* (2021) utilizaram outros sensores de temperatura e umidade relativa do ar e de luminosidade na confecção do sistema de monitoramento e obtiveram resultados satisfatórios durante o período de aquisição de dados no qual não foi verificado nenhum problema no funcionamento do sistema e nem nos sensores. De acordo com a pesquisa feita por Argôlo *et al.* (2020), foi comprovado que o sensor de CO<sub>2</sub> apresentou estabilidade durante todo o período de experimentação. No entanto, o sensor utilizado por eles foi o MQ135.

De acordo com Triawan *et al.* (2023), os dados apresentados pelo projeto de monitoramento ambiental das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar, pelo sensor BME 280, são precisos e há mudanças consistentes. Além disso eles relatam que o sensor pode funcionar bem para a aquisição de dados. De acordo com Tagle *et al.* (2020), o sensor BME 280 apresentou um bom ajuste e precisão das medições de umidade relativa do ar. No entanto, eles acreditam que foi detectada alguma subestimação nos valores da umidade relativa do ar em 2 das estações que eles estavam monitorando, indicando que poderia estar ocasionando alguma possível interferência no senso. Além disso, os autores encontraram uma discrepância entre o sensor BME280 e o sensor de referência, o que pode ser sugestivo de que o design que envolve do sensor pode impor limitações adicionais.

## 4 CONCLUSÃO

A integração da plataforma de desenvolvimento com sensores de baixo custo resultou em um sistema aplicável em sistemas de cultivo protegido, viabilizando a coleta de dados e auxiliando a tomada de decisões.

O sistema desenvolvido apresentou um custo final de construção de aproximadamente R\$ 692,94 ou US\$ 140,84.

As curvas de calibração específicas para cada sensor mostraram-se eficientes na correção dos dados, utilizando o sensor de referência como base comparativa, apresentando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) em uma faixa de 0,88 a 0,99.

O tempo de resposta do sensor MH-Z19B foi de 30 s, o do sensor RY-GH de 1,4 s e o do BME 280 de 24 s. No entanto, somente os tempos de resposta dos sensores RY-GH e MH-Z19B estiveram em conformidade com as especificações dos datasheets correspondentes, confirmando a precisão desses dispositivos.

A confiabilidade do sistema foi evidenciada pela operação contínua ao longo do período de validação, sem ocorrência de travamentos, ausência ou falha de dados. Além disso, para o sensor MH-Z19B apresentou coeficiente de Pearson em uma faixa de -0,53 a 0,89 e os erros (MAE e RMSE) em uma faixa de 50 a 70 ppm. O sensor RY-GH apresentou o coeficiente de Pearson em uma faixa de 0,80 a 0,88 e os erros (MAE e RMSE) em uma faixa de 50 a 80  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ . E, o sensor BME 280 apresentou o coeficiente de Pearson 0,90 a 0,99 em uma faixa de e os erros (MAE e RMSE) em uma faixa de 1 a 2  $^{\circ}\text{C}$  (para a temperatura do ar) e 6 a 10 % (para a umidade relativa do ar)

Todos os sensores analisados mantiveram uma resposta consistente durante todo o período de monitoramento.

Dessa forma, o sistema de monitoramento agrometeorológico não apenas se destaca pela sua economia, mas também se revela como uma solução confiável e eficiente para a coleta precisa de dados agrometeorológicos, sendo uma oportunidade para monitorar com precisão e baixo custo as condições agrometeorológicas.

## REFERÊNCIAS

- ARGÔLO, Eduardo Dourado *et al.* Plataforma Meteorológica em Arduino para Monitoramento de Dióxido de Carbono e Monóxido de Carbono Assistidos de Parâmetros Meteorológicos. **ETIS - Journal of Engineering, Technology, Innovation and Sustainability** p. 65–79 , 24 jul. 2020.
- BOSH, BME280 – Combined humidity and pressure sensor. Disponível em: <[https://curtocircuito.com.br/datasheet/sensor/pressao\\_temperatura\\_e\\_umidade-BME280.pdf](https://curtocircuito.com.br/datasheet/sensor/pressao_temperatura_e_umidade-BME280.pdf)>
- BRZEZINSKI, Cristian Rafael *et al.* Production of iceberg lettuce cultivars under two cropping systems. **Revista Ceres** v. 64, n. 1, p. 83–89 , 2017.
- DA CUNHA, Antonio Ribeiro. Programação, conexão e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar de baixo custo em micrologger para estudos agrometeorológicos. **Revista Brasileira de Meteorologia** v. 28, n. 2, p. 221–232 , 2013.
- EMBRAPA. Visão 2030 - o futuro da agricultura brasileira. **Embrapa** p. 212 , 2018. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/futuro>>.978-85- 7035-799- 1.
- FISHER, D. K.; GOULD, P. J. Open-source hardware is a low-cost alternative for scientific instrumentation and research. **Modern Instrumentation**, v. 1, n. 2, p. 8-20, 2012.
- HUNTER, Gary W. *et al.* Editors' Choice—Critical Review—A Critical Review of Solid State Gas Sensors. **Journal of The Electrochemical Society** v. 167, n. 3, p. 1–31 , 2 jan. 2020.
- INSTRUTHERM, Manual de instruções – Detector de 3 gases digital portátil modelo DG-300. Disponível em: <[https://www.instrutherm.com.br/media/hexaattachment/products/attachments/Manual\\_DG-300.pdf](https://www.instrutherm.com.br/media/hexaattachment/products/attachments/Manual_DG-300.pdf)>
- LARA, Juan Carlos Duron; GUTIERREZ, Sebastian; RODRIGUEZ, Francisco. Low Cost Greenhouse Monitoring System Based on Internet of Things. **2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)** p. 1–6 , 5 dez. 2019.978-1-7281-3304-1.
- LESSIN, Ricardo Contreira; GHINI, Raquel. Efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre o oídio e o crescimento de plantas de soja. **Tropical Plant Pathology** v. 34, n. 6, p. 385–392 , 2009.
- MARQUES FILHO, Aldir Carpes; RODRIGUES, Jean Paulo; DAL PONTE, Gabriel Buligon. Plataforma arduino aplicada no desenvolvimento de um sistema de coleta de dados micro-ambientais em casas de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas** p. 190–206 , 31 ago. 2021.
- MORAES, Cristiano Pedroso De; ALMEIDA, Marcílio De. Influência climática sobre a plasticidade fenotípica floral de *Catsetum fimbriatum* lindley. **Ciência e Agrotecnologia** v. 28, n. 4, p. 942–948 , 2004.

NONG-IOT, Photosynthetically effective radiation sensor (RY-GH). Disponível em: <<https://en.nong-iot.com/assets/uploads/RY-GH2.pdf>>

NUNES, Edson Luis *et al.* Monitoramento ambiental de área controlada para produção de orquídeas: caracterização sazonal das variáveis climáticas. **Revista Ponto de Vista** v. 9, n. 2, p. 37–53, 1 out. 2020.

ONSET. HOBO® Temp/RH 3.5% Data Logger (UX100-003) Manual. Disponível em: <<https://cdn02.duxcloud.com.br/sigma/products/9/files/datasheet-8SWZMOOS.pdf>>.

ONSET. HOBO® LCD Data Logger (H14-001, H14-002) User's Manual. Disponível em: <<https://www.onsetcomp.com/sites/default/files/resources-documents/7054-B%20MAN-H14-00X.pdf>>.

PAES, Juliana L. *et al.* Automation of monitoring of drying parameters in hybrid solar-electric dryer for agricultural products. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 26, n. 4, p. 283–291, 2022.

PURQUERIO, Luis Felipe Villani; TIVELLI, Sebastião Wilson. Manejo Do Ambiente Em Cultivo Protegido. **Journal of Chemical Information and Modeling** v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.9788578110796.

SANTOS, Jacielle da Costa; SANTOS, Maria Isabel Gomes. Consequências do uso de agrotóxicos na agricultura: Uma revisão bibliográfica. **Research, Society and Development** v. 12, n. 10, p. 1–10, 15 out. 2023.

SILVA, Késia da Silva; MORAES, Sérgio Oliveira. Desenvolvimento de um sistema automatizado de baixo custo para aquisição de dados de temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** p. 189–195, 2002.

SOUSA, F. C. ; TINÔCO, I. F. F. ; SARAZ, J.A.O. ; ROCHA, K.S.O. ; RAMIREZ, M. A. . Saraz method adjustment for the quantification of ammonia emissions generated in opened or hybrid animal production facilities. **DYNA (MEDELLÍN)**, v. 83, p. 61-68, 2016.

TAGLE, Matías *et al.* Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. **Environmental Monitoring and Assessment** v. 192, n. 3, p. 171, 10 fev. 2020.

TERUEL, Bárbara J. Automated control in greenhouses: Climatic variables and fertigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 14, n. 3, p. 237–245, 2010.

TILMAN, David *et al.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011.

TRIAWAN, Muhammad Agus; HUSNAWATI, Husnawati; HUMAM, Faris. Sistem Pemantauan Lingkungan Menggunakan Sensor BME280 Berbasis Internet of Things. **Jurnal Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi** v. 15, n. 2, p. 37–41, 31 jul. 2023.

VIMAL, P V; SHIVAPRAKASHA, K S. IOT based greenhouse environment monitoring and controlling system using Arduino platform. **2017 International Conference on Intelligent**

**Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)** p. 1514–1519 , 23 abr. 2018.978-1-5090-6106-8.

WALTER, Lidiane Cristine; ROSA, Hamilton Telles; STRECK, Nereu Augusto. Mecanismos de aclimação das plantas à elevada concentração de CO<sub>2</sub> Acclimation mechanisms to elevated CO<sub>2</sub> in plants. **Ciência Rural** v. 45, n. 9, p. 1564–1571 , 2015.

WILLETT, Walter *et al.* Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. **The Lancet** v. 393, n. 10170, p. 447–492 , 2019.

WINSEN. Intelligent Infrared CO<sub>2</sub> Module (Model: MH-Z19B). Disponível em: < [https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1\\_0.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf) >