

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**GABRIELA NAZARÉ RIBAS**

**SISTEMA AUTOMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DE ESTRESSE TÉRMICO EM  
CULTURAS AGRÍCOLAS**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2023**

**GABRIELA NAZARÉ RIBAS**

**SISTEMA AUTOMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DE ESTRESSE TÉRMICO EM  
CULTURAS AGRÍCOLAS**

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

Orientador: João Victor Pereira Oliveira  
Coorientadora: Maria Antônia Santos de Carvalho

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2023**

**GABRIELA NAZARÉ RIBAS**

**SISTEMA AUTOMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DE ESTRESSE TÉRMICO EM  
CULTURAS AGRÍCOLAS**

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


APROVADO: 07 de julho de 2023.

Assentimento:



---

Gabriela Nazaré Ribas  
Autora



---

João Victor Pereira Oliveira  
Orientador

## RESUMO

RIBAS, Gabriela Nazaré, Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Sistema automático para simulação de estresse térmico em culturas agrícolas**. Orientador: João Victor Pereira Oliveira. Coorientadora: Maria Antônia Santos de Carvalho.

Estudos e acompanhamentos climáticos, como o Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas (IPCC), projetam um aumento da temperatura global em 1,5°C devido as mudanças climáticas. Com tal cenário, há a necessidade de estudos para avaliar os impactos desse aumento de temperatura do ar no desenvolvimento das principais culturas econômicas do Brasil, como por exemplo, o café. Sendo assim, três estufas, que possuíam controle e automação da temperatura do ar interna, foram desenvolvidas para a condução do experimento. A estufa 1 tinha a temperatura do ar interna mais próxima da temperatura do ar do ambiente externo as estufas, a estufa 2 era aquecida até apresentar uma temperatura do ar 1,5°C a mais que a estufa 1, já a estufa 3 era aquecida até apresentar uma temperatura do ar com 3,0°C a mais que a estufa 1. Para esses valores de temperatura do ar serem mantidos, as estufas foram automatizadas com sensores e equipamentos de baixo custo, mas que suprissem as necessidades do experimento. Para consolidar o funcionamento do sistema de controle e automação das estufas, com o experimento foi possível acompanhar a temperatura do ar e a umidade relativa do ar interno das estufas e do ambiente externo. Para avaliar o impacto desse ambiente de estresse térmico desenvolvido nas plantas de café, foram distribuídas dentro das estufas três cultivares diferentes, sendo eles, Coffea arabica, Catucaí Amarelo 24/137, Catucaí Amarelo 2SL e MGS Paraíso 2 (Catucaí Amarelo IAC 30 x Híbrido de Timor UFV 445-46). Além do aumento de temperatura do ar, parte das plantas também foram submetidas a estresse hídrico, para analisar o desenvolvimento de cada cultivar. Foram avaliadas, por meio do teste de Tukey, as seguintes características das plantas de café, o diâmetro do ramo principal, o número de ramos plagiotrópicos, o número de nós no ramo ortotrópico e a altura das plantas. De forma geral, a estrutura desenvolvida foi eficiente em manter as temperaturas do ar no interior de cada estufa de acordo com a lógica elaborada, realizando o acionamento dos exaustores da maneira como era esperado. Entretanto, o controle da temperatura do ar da estufa 3 apresentou melhores resultados quando avaliados pela estatística descritiva devido as limitações construtivas do local onde as estufas foram construídas. Com a avaliação da umidade relativa no interior das estufas observou-se que elas apresentavam valores próximos entre si, mas, quando comparadas com a umidade do ambiente externo as estufas, apresentavam um valor significativamente menor que a umidade relativa do ambiente externo, principalmente no período diurno. Com relação as

avaliações das plantas de café, a temperatura do ar se mostrou como fator responsável pelo aumento da diferenciação significativa entre os cultivares, já que alguns cultivares apresentaram maior plasticidade com relação ao estresse hídrico e ao aumento da temperatura.

**Palavras-chaves:** variação climática; temperatura; automação e controle; café.

## ABSTRACT

RIBAS, Gabriela Nazaré, Universidade Federal de Viçosa, July, 2023. **Automatic system for simulating thermal stress in agricultural crops.** Adviser: João Victor Pereira Oliveira. Co-advisers: Maria Antônia Santos de Carvalho.

Studies and climate monitoring, such as the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), project a global temperature increase of 1.5°C due to climate change. With such a scenario, studies need to assess the impacts of this increase in air temperature on the development of Brazil's main economic crops, such as coffee. Therefore, three greenhouses, equipped with internal air temperature control and automation, were developed to conduct the experiment. Greenhouse 1 had an internal air temperature closest to the external air temperature of the greenhouses, Greenhouse 2 was heated to maintain an air temperature 1.5°C higher than Greenhouse 1, and Greenhouse 3 was heated to maintain an air temperature 3.0°C higher than Greenhouse 1. In order to maintain these air temperature values, the greenhouses were automated with low-cost sensors and equipment that met the experiment's needs. To validate the functioning of the greenhouse control and automation system, the experiment allowed for monitoring of the internal air temperature and relative humidity of the greenhouses, as well as the external environment. To assess the impact of this thermal stress environment on coffee plants, three different cultivars were distributed within the greenhouses: *Coffea arabica*, Catucaí Amarelo 24/137, Catucaí Amarelo 2SL, and MGS Paraíso 2 (Catucaí Amarelo IAC 30 x Híbrido de Timor UFV 445-46). In addition to the increased air temperature, a portion of the plants was also subjected to water stress to analyze the development of each cultivar. The following characteristics of the coffee plants were evaluated using the Tukey test: main branch diameter, number of plagiotropic branches, number of nodes on the orthotropic branch, and plant height. Overall, the developed structure was efficient in maintaining the air temperatures inside each greenhouse according to the established logic, activating the exhaust fans as expected. However, the control of the air temperature in Greenhouse 3 showed better results when evaluated by descriptive statistics, due to limitations in the construction of the location where the greenhouses were built. Evaluating the relative humidity inside the greenhouses, it was observed that they had similar values among themselves but significantly lower relative humidity compared to the external environment, especially during the daytime. Regarding the evaluations of the coffee plants, the air temperature was found to be a factor responsible for the significant differentiation between cultivars, as some cultivars showed greater plasticity in response to water stress and increased temperature.

**Keywords:** climate variation; temperature; automation and control; coffee.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DA TEMPERATURA DO AR</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Estrutura das estufas</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Instalação elétrica</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Instrumentação das estufas para o controle da temperatura das estufas</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Automação/lógica de programação</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DAS MUDAS DE CAFÉ</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Validação da estrutura de controle e automação desenvolvida</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Avaliação do impacto do estresse térmico e hídrico nas plantas de café</b> .....	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DA TEMPERATURA DO AR</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Operação dos exaustores</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Avaliação das temperaturas</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>AVALIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3</b>	<b>AVALIAÇÃO DAS MUDAS</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Altura</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Número de ramos plagiotrópicos</b> .....	<b>29</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Número de nós no ramo ortotrópico</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Diâmetro do ramo ortotrópico</b> .....	<b>32</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Impacto da temperatura nas características avaliadas</b> .....	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O clima mundial vem passando por períodos de grandes mudanças, sendo marcado pelo aumento da temperatura média global, variação no comportamento de fenômenos meteorológicos, como *El niño* e *La niña*, além de alteração dos padrões de precipitação e correntes de vento. Segundo o Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas (IPCC) (2021), as mudanças climáticas são consequências de fatores como o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE). No recente relatório do IPCC, foi apresentado um aumento em 1,1°C da temperatura do ar da superfície da Terra entre os períodos de 2011 a 2020 comparado com o período de 1850 a 1900, o que mostra que uma intensificação das mudanças climáticas nas últimas décadas.

Com o intuito de prever os possíveis impactos das mudanças climáticas no planeta, o IPCC realizou projeções, por meio de modulação, de oito cenários climáticos para o século XXI considerando o aumento de temperatura do ar de 1,5°C a 4,0°C e os níveis de emissão GEE (IPCC, 2023). Além das mudanças de temperatura, as projeções indicam uma diminuição na umidade do solo em grande parte da América Central e América do Sul, e aumento na precipitação anual para as mesmas localidades (IPCC, 2023). Dentre os dados apresentados pelo IPCC apontam-se impactos adversos a nível global nas produções agrícolas, na pesca e altos riscos de danos em áreas costeiras devido a inundações provocadas pelo aumento do nível do mar (IPCC, 2023).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) realizou um estudo relacionando o aumento da temperatura do ambiente com a extensão das zonas de risco para se realizar o plantio, para culturas como soja, café e milho (GIRARDI et al., 2008). Com a pesquisa realizada pela Embrapa foi possível observar uma diminuição significativa das áreas favoráveis para os cultivos no Brasil, principalmente quando a média da temperatura do ambiente aumenta em mais de 3,0°C (GIRARDI et al., 2008). Para o café, é esperado que a cultura passe a ser mais comum no Sul do Brasil, pois, com o aumento da temperatura do ambiente, os riscos de abortamento de flores e de deficiência hídrica se tornam mais frequentes. Além disso, maiores temperaturas diminuem as chances de geadas na região Sul, sendo um clima mais propício para o cultivo (GIRARDI et al., 2008). Uma forte consequência para o café, devido ao aumento da temperatura, é a perturbação do metabolismo das plantas, afetando a produtividade do café em quantidade e, principalmente em qualidade, já que a alta temperatura podem promover um amadurecimento além do esperado no fruto (CAMARGO, 2010).

A perspectiva de que o cultivo do café venha a diminuir nas regiões centrais no país, principalmente no Sudeste e parte do Nordeste, para aumentar na região Sul do Brasil, traz impactos econômicos não apenas para a população das respectivas regiões, mas para o país. Atualmente o café é um dos produtos mais importantes do agronegócio brasileiro, tanto no mercado interno, quanto externo. O café e seus derivados movimentaram cerca de 30,7 bilhões de reais do Produto Interno Bruto (PIB) só no ano de 2017 (SESSO; SESSO FILHO; PEREIRA, 2021). Dessa forma, e os estudos sobre os seus efeitos das mudanças climáticas sob as culturas mais importantes para o PIB do Brasil se mostram mais que necessários.

Para o estudo de condições extremas, é interessante o uso de ambientes controlados, para conseguir desenvolver um ambiente que tenha as condições de interesse e realizar as avaliações do impacto em mudas e cultivares. Uma das formas de proporcionar esse controle é por meio de estufas, que são construídas com o objetivo de simular um ambiente com microclima que pode ser controlado e ajustado para as necessidades e propósitos de pesquisas e produções agrícolas, sejam frutíferas, mudas ou até ornamentais, como flores (COELHO; OLIVEIRA; CUNHA, 2005).

Para construir uma estufa eficiente, pode-se realizar a automação e controle da estrutura, e assim, as condições do ambiente interno da estufa podem ser controladas por meio de atuadores que operam de acordo com a temperatura, umidade e nível de CO<sub>2</sub>, por exemplo (COELHO; DE MOURA; CUNHA, 2005). Portanto, com uma estufa que possui meios de coletar dados do seu ambiente e atuar de acordo com as necessidades é possível prever e buscar soluções para o comportamento da planta. Dessa forma, objetivou-se com este trabalho desenvolver um sistema automatizado para o controle da temperatura do ar de estufas, testar seu funcionamento, avaliar o comportamento da umidade relativa no interior das estufas e avaliar também o efeito do estresse térmico e hídrico em mudas de cultivares do café *Coffea arabica L.*

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

A estrutura, para a coleta de dados e realização das análises, foi construída na EPAMIG – Sudeste, localizada na Vila Gianetti no Bairro Santo Antônio, na cidade de Viçosa, em Minas Gerais, Zona da Mata Mineira. Essa localização possui as coordenadas Latitude 20°45'14'' Sul e Longitude 42°52'53'' e se encontra dentro da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Campus Viçosa.

### **2.1 DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DA TEMPERATURA DO AR**

#### **2.1.1 Estrutura das estufas**

Foram construídas três estufas na dimensão de 4x3m, com espaçamento de aproximadamente 0,5 m entre si e com um exaustor instalado em cada uma, de 0,3 m de diâmetro. Cada estufa é composta por uma porta de 2,1x0,8 m e uma escotilha de 0,4x0,4 m, sendo que, em cada escotilha foi instalada uma tela que permite a passagem de ar, mas que protege da entrada de animais. A estrutura é composta de ferro galvanizado, com fechamento de lona transparente, e telhado abaulado de raio 70 cm, como apresentado na Figura 1. Foi colocada brita sobre o chão batido para melhorar a circulação da equipe no seu interior. Além disso, foram instalados na área das estufas um ponto de rede elétrica, e um ponto de acesso a água. Na Figura 2 é apresentado a parte da frente das três estufas utilizadas para o experimento.

Figura 1 - Interior das estufas com estrutura de ferro galvanizado, fechamento de lona e teto abaulado



Fonte: Autora.

Figura 2 - Parte frontal das três estufas



Fonte: Autora.

### 2.1.2 Instalação elétrica

Foram utilizados aproximadamente 125,0 m de cabo blindado rígido de 8 vias e 25,0 m de cabo blindado flexível de 4 vias. O ponto da rede elétrica disponível é monofásico 127 V. Cada estufa teve uma tomada de energia instalada. Um disjuntor termomagnético foi instalado para proteção geral do circuito.

Os exaustores possuem potência nominal de 130 W, com rotação de 1650 rpm (Rotação por Minuto) e podem atuar também como ventiladores. Foram instalados de forma que são capazes de serem usados tanto manualmente, quanto automaticamente sendo comandado pelo

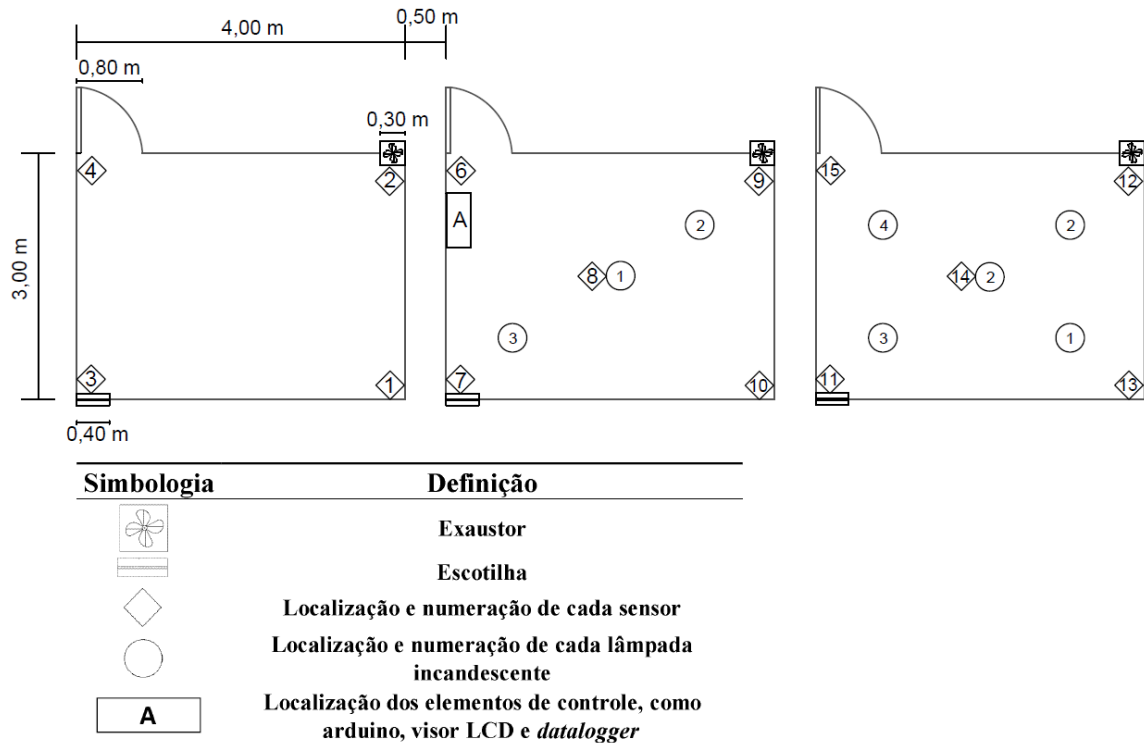
sistema desenvolvido. Para que o modo de operação fosse escolhido, foi instalado um interruptor em paralelo com o sistema de acionamento automático dos exaustores, porém em série com o circuito de acionamento manual.

Para possibilitar diferentes valores de temperatura nas estufas, foram utilizadas oito lâmpadas incandescentes de 250 W como fonte de calor, que diferente dos exaustores, ficavam ligadas constantemente em potência máxima. Todas as lâmpadas foram instaladas a, aproximadamente, 2,00 m do chão, para que o calor emitido prejudicasse o mínimo possível as mudas mais próximas. O valor de 2,00 m foi obtido depois de testes realizados, avaliando o efeito da lâmpada sobre as plantas quando estavam a 1,80 m e a 2,00 m do chão, determinando assim que a altura de 2,00 m era a menos prejudicial. Na estufa 2 foram utilizadas 3 lâmpadas e na estufa 3 foram utilizadas 5 lâmpadas.

### **2.1.3 Instrumentação das estufas para o controle da temperatura das estufas**

Foram utilizados 15 sensores digitais do modelo DHT22, que são capazes de realizar leituras de temperatura e umidade, conforme descrito no datasheet DHT22 (LIU, 2019). Na estufa 1 foram instalados 4 sensores, cada um em uma extremidade da estufa. Nas estufas 2 e 3 foram instalados cinco dos mesmos sensores, com a mesma disposição, mas com o quinto sensor localizado ao centro das estufas, como indicado na Figura 3. Essa disposição foi adotada para garantir que a média final das leituras de temperaturas do ar interna seja representativa de toda a área da estufa, cobrindo as áreas de maior e menor fluxo de ar. Além dos sensores do interior das estufas, foi alocado um sensor externo para monitorar a temperatura do ar e a umidade relativa ambiente.

Figura 3 - Características das estufas construídas e posicionamento dos principais componentes, como sensores, lâmpadas, exaustores e escotilha



Fonte: Autora.

Os sensores internos foram posicionados a, aproximadamente, 1,70 m acima do chão da estufa. Dessa forma, a aferição de dados não seria comprometida devido a influências diretas decorrentes do fluxo de ar do exaustor ou da escotilha. Dentre os 15 sensores utilizados, como é possível observar na Figura 3, 14 deles foram distribuídos entre as estufas 2 e 3, e um deles ficou do lado de fora das estufas e foi nomeado como sensor externo. O sensor externo foi posicionado a, aproximadamente, 1,50 m da porta de entrada da estufa 2 no topo de uma estrutura vertical de madeira de 2,80 m de altura e com uma proteção de compensado pintado de branco para proteger o sensor da chuva e do sol, como apresentado na Figura 4. Devido ao desnível do local, observado na Figura 4, o sensor externo fica a 2,00 m de altura quando comparado com chão de brita da estufa. A diferença de altura entre os sensores no interior das estufas com o sensor externo não é significativa, já que o propósito do sensor externo foi coletar dados de temperatura do ar e umidade relativa do ambiente externo as estufas.

Figura 4 - Localização do sensor DHT22 responsável pelas leituras de temperatura do ar e umidade relativa externa as estufas



Fonte: Autora.

#### 2.1.4 Automação/lógica de programação

A estufa 1 foi considerada como a referência para o controle das outras, ou seja, sua temperatura do ar interna era o mais próximo possível da temperatura do ar ambiente. A estufa 2, apresentava uma temperatura do ar interna de  $1,5^{\circ}\text{C}$  acima da temperatura do ar da estufa 1. A estufa 3 deve apresentar uma temperatura do ar interna de  $3,0^{\circ}\text{C}$  acima da temperatura da estufa 1.

O controle da temperatura do ar teve como atuadores os exaustores das estufas. Para que os exaustores fossem ativados pelo sistema, foi incorporado ao circuito elétrico de cada exaustor um módulo relé de 5V e um transistor TIP120. Ambos os componentes eletrônicos recebem o sinal de comando de acordo com a lógica da programação, fazendo os exaustores acionarem ou desligarem.

O sistema automático desenvolvido tem como base a plataforma Arduino Mega, com o microcontrolador ATMEL ATmega2560 e software Arduino IDE versão 2.0.3, com linguagem em C++. Juntamente ao Arduino, foi utilizado um *Datalogger* com cartão *Secure Digital Card* (SD) de 16G para salvar os dados de leitura, e um *Real Time Clock* (RTC) para registro de tempo. Outro componente eletrônico instalado foi o visor *Liquid Crystal Display* (LCD) alfa numérico 16x2 que indica a temperatura do ar e umidade relativa, tanto do ambiente externo, quanto em cada uma das estufas. O RTC, LCD, *Datalogger*, SD e Arduino Mega foram instalados no interior da estufa 2 a 1,00 m da porta de acesso, por ser um local central para a distribuição dos cabos utilizados para os sensores e relés de acionamento dos exaustores. Na

Tabela 1 é mostrado a pinagem utilizada para cada um dos componentes eletrônicos, sendo que, a localização de cada sensor DHT22 numerado na Tabela 1 se encontra representada no esquema apresentado pela Figura 3.

Tabela 1 - Relação da pinagem utilizada do Arduino com o componente conectado

Pino do Arduino	Componente
3	Sensor externo (5)
4	Sensor 4
5	Sensor 5
6	Sensor 2
8	Sensor 1
22	Sensor 6
23	Sensor 7
24	Sensor 8
25	Sensor 9
26	Sensor 10
47	Sensor 11
49	Sensor 12
53	Sensor 13
48	Sensor 14
44	Sensor 15
14	Relé do exaustor da estufa 1
16	Relé do exaustor da estufa 2
18	Relé do exaustor da estufa 3
41	LCD - RS
40	LCD - E
39	LCD - D4
38	LCD - D5
37	LCD - D6
36	LCD - D7
10	Cartão SD

Fonte: Autora.

A lógica de programação consiste em acionar os exaustores quando os valores de temperatura do ar interna, coletadas pelos sensores DHT22, são ultrapassados e desligá-los quando não forem atingidas, ou seja, o objetivo é sempre manter a diferença de temperatura entre as estufas. A temperatura do ar de cada estufa foi definida pela média das leituras dos sensores instalados, pois a temperatura do ar e a umidade relativa não são uniformes ao longo de toda a estufa. A cada 10 minutos, os dados eram armazenados no cartão SD inserido no *datalogger*. Os seguintes dados eram armazenados: a média de temperatura nos 10min em cada um dos sensores; a diferença de temperatura entre as estufas; e o status dos exaustores. O experimento foi conduzido durante sessenta dias, compreendidos entre 29/03/2023 até 09/06/2023.

No desenvolvimento da programação foram utilizadas bibliotecas para os sensores DHT22, o cartão SD, o LCD e para o RTC, dentre outras listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação das bibliotecas utilizadas na programação desenvolvida

<b>Biblioteca</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Link de acesso as bibliotecas utilizadas</b>
SD.h	Cartão SD	<a href="https://github.com/arduino-libraries/SD">github.com/arduino-libraries/SD</a>
RTClib.h	Relógio RTC	<a href="https://github.com/adafruit/RTClib">github.com/adafruit/RTClib</a>
LiquidCrystal.h	Tela LCD	<a href="https://github.com/arduino-libraries/LiquidCrystal">github.com/arduino-libraries/LiquidCrystal</a>
DHT.h	Sensor de temperatura e umidade DHT22	<a href="https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library">github.com/adafruit/DHT-sensor-library</a>
Adafruit_Sensor.h	Extensão para utilizar o sensor DHT22 em algumas versões da IDE do Arduino	<a href="https://github.com/adafruit/Adafruit_Sensor">github.com/adafruit/Adafruit_Sensor</a>
Adafruit_BusIO_Register.h	Extensão para algumas versões da IDE do Arduino	<a href="https://github.com/adafruit/Adafruit_BusIO/blob/master/Adafruit_BusIO_Register.h">github.com/adafruit/Adafruit_BusIO/blob/master/Adafruit_BusIO_Register.h</a>

Fonte: Autora.

## 2.2 AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DAS MUDAS DE CAFÉ

Foram utilizadas três cultivares diferentes de *Coffea arabica*, sendo eles, o Catucaí Amarelo 24/137, o Catucaí Amarelo 2SL e o MGS Paraíso 2 (Catucaí Amarelo IAC 30 x Híbrido de Timor UFV 445-46). As mudas tinham 1,3 anos quando se iniciou o estudo. Em cada estufa foi instalado um experimento em delineamento de blocos casualizados, com seis repetições, disposto em esquema de parcelas subdivididas, composto pelas três cultivares de café e dois níveis de irrigação: com e sem estresse hídrico por déficit. Para aplicação do estresse hídrico, o controle recebeu 0,25 L de água todos os dias, enquanto o nível com estresse hídrico foi composto pela aplicação de 0,25 L em dias alternados. Na Tabela 3 é apresentado a relação dos nomes dos cultivares com a sua identificação.

Todas as análises das plantas foram realizadas a cada 4 semanas e foi avaliado o crescimento de cada muda, comparando os resultados com as condições de temperatura do ar e umidade relativa ao decorrer dos sessenta dias de experimento. Portanto, foram realizados, em cada uma das mudas, o acompanhamento do diâmetro do caule, da altura da planta, do número de nós no ramo ortotrópico, e do número de ramos plagiotrópicos.

Antes de iniciar as análises, todas as mudas foram marcadas de forma a ajudar na avaliação dos seus desenvolvimentos. Na base do caule, a aproximadamente 0,25 m do

substrato, foi feita uma marcação para ser referência tanto para a análise do diâmetro do caule quanto para a altura da planta. Para o caso das análises de números de nós, foram marcados o último nó do ramo ortotrópico no tempo zero, para assim, realizar a contagem dos novos a partir deles.

A análise do diâmetro foi realizada com o auxílio de um paquímetro digital, no local da marcação do caule em duas direções diferentes no caule, visto que ele não será um cilindro perfeito com o mesmo diâmetro em toda a circunferência. A marcação na base também é referência para a análise da altura da muda que é feita com o auxílio de uma trena, da marcação até o último nó da muda.

As análises de número de nós no ramo ortotrópico e número de ramos plagiotrópicos foram realizadas por meio de contagem manual a partir das regiões marcadas inicialmente. O número de nós no ramo ortotrópico se refere aos locais onde existe saída de novas folhas no caule principal da muda. E por último, a análise de número de ramos plagiotrópicos, que se trata da contagem dos ramos horizontais que se ramificam do caule principal.

Tabela 3 - Relação do número e o tipo de cultivar

<b>Número do cultivar</b>	<b>Cultivar</b>
Cultivar 1	MGS Paraíso 2
Cultivar 2	Catucaí Amarelo 2SL
Cultivar 3	Catucaí Amarelo 24/137

Fonte: Autora.

## **2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS**

### **2.3.1 Validação da estrutura de controle e automação desenvolvida**

Para a análise dos dados de temperatura do ar e umidade relativa, foi utilizado a estatística descritiva, por meio de média, desvio padrão, variância e grupo amostral. Os dados coletados foram analisados e interpretados por meio de gráficos comparando a diferença de temperatura entre as estufas e o estado do ambiente interno. Outra análise foi realizada com base no *status* dos exaustores, para verificar a ação de controle de acordo com os valores de temperatura esperados.

### **2.3.2 Avaliação do impacto do estresse térmico e hídrico nas plantas de café**

Para a análise estatística dos resultados nas plantas foi utilizado o software R. (R Core Team, 2022). Foi realizada uma análise de variância com dados do crescimento das plantas ao nível de 5% de significância. Em seguida foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

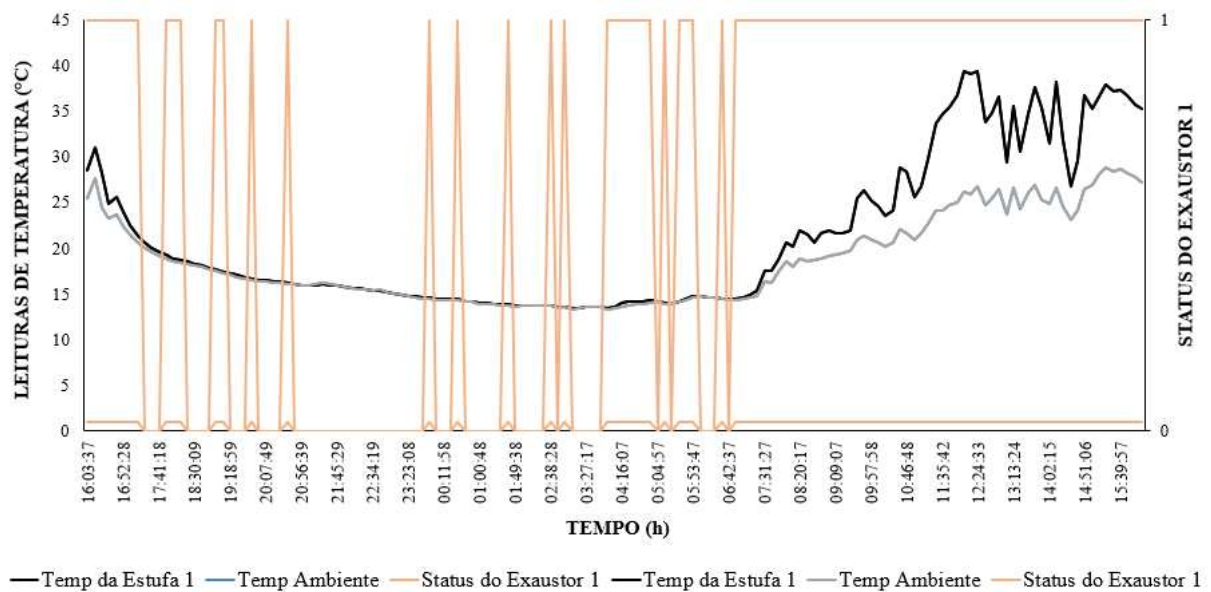
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DA TEMPERATURA DO AR

##### 3.1.1 Operação dos exaustores

O Gráfico 1 apresenta os dados coletados das 16h do dia 12/05/2023 até 16h do dia 13/05/2023, com as informações da temperatura do ambiente externo, da temperatura interna da estufa 1 e do estado do exaustor da estufa 1.

Gráfico 1 - Status de operação do exaustor 1 em função da diferença da temperatura do ar do ambiente externo as estufas e a temperatura do ar interno das estufas para os dias 12/05/2023 a 13/05/2023



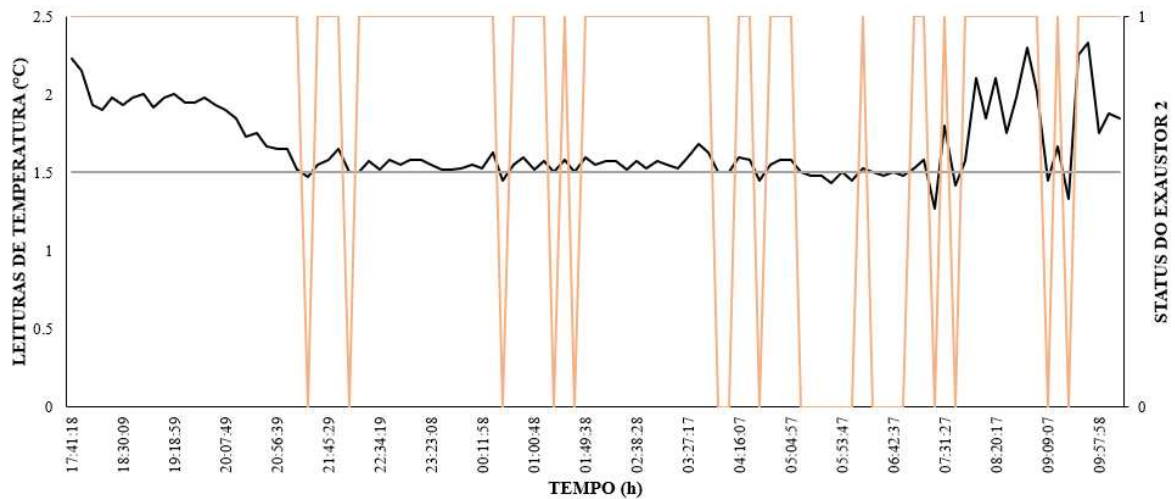
Fonte Autora.

A lógica de controle do exaustor da estufa 1 foi desenvolvida para que o exaustor acionasse toda vez que a temperatura do ar interna da estufa 1 ficasse acima da temperatura do ar do ambiente externo, visto que o objetivo foi manter a estufa 1 com a temperatura do ar interna o mais próxima possível da temperatura do ar do ambiente externo. O nível lógico 0 indica que o exaustor está desligado e o nível lógico 1, que o exaustor está ligado, sendo assim, o exaustor da estufa 1 passou todo o período diurno ligado, e variando o status em alguns períodos da noite. O comportamento oscilatório pode ser explicado pelo fato da estufa ser um ambiente fechado e protegido. Sendo assim, o microclima interno da estufa apresentou um

tempo de resposta maior às mudanças de temperatura do ar externa. Portanto, mesmo sendo no período da noite, o sensor externo e os sensores internos da estufa apresentaram leituras diferentes em alguns momentos. Outro ponto a ser considerado é a sensibilidade dos sensores, de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  (LIU, 2019), em que qualquer mudança na casa decimal da leitura pode acusar uma diferença entre as leituras de temperatura interna e externa. Tal comportamento indica que a lógica de programação operou de acordo com o propósito inicial.

O Gráfico 2 e o Gráfico 3 apresentam o funcionamento dos exaustores das estufas 2 e 3, respectivamente, para os dados coletados no período das 16h do dia 12/05 até as 16h do dia 13/05.

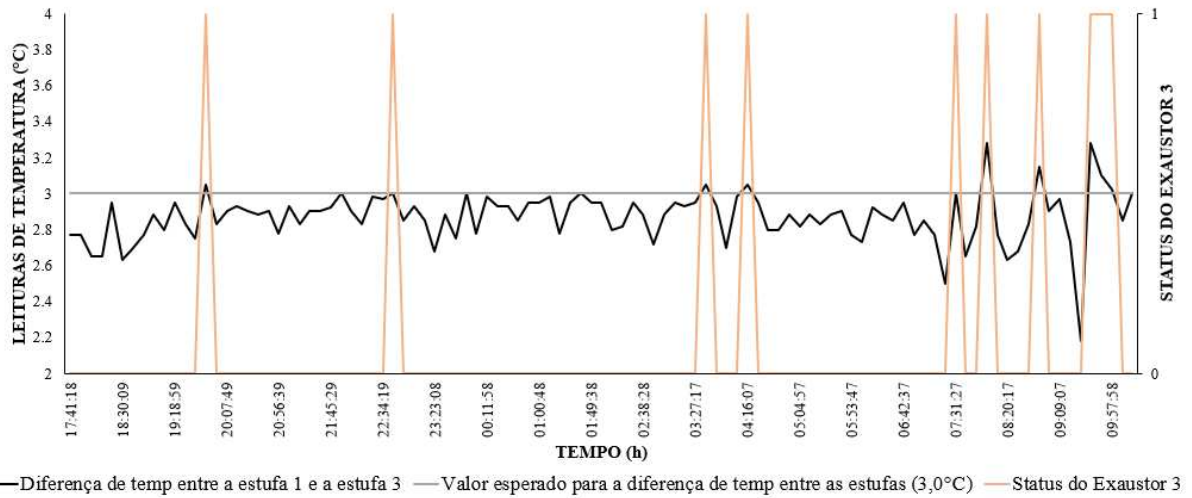
Gráfico 2 - Status de operação do exaustor 1 em função da diferença da temperatura do ar interno da estufa 1 com a estufa 2 e o valor de referência de  $1,5^\circ\text{C}$  para os dias 12/05/2023 a 13/05/2023



— Diferença de temp. entre a estufa 1 e estufa 2 — Valor esperado para a diferença de temp entre as estufas ( $1,5^\circ\text{C}$ ) — Status do Exaustor 2

Fonte: Autora.

Gráfico 3 - Status de operação do exaustor 1 em função da diferença da temperatura do ar interno da estufa 1 com a estufa 3 e o valor de referência de 3,0°C para os dias 12/05/2023 a 13/05/2023



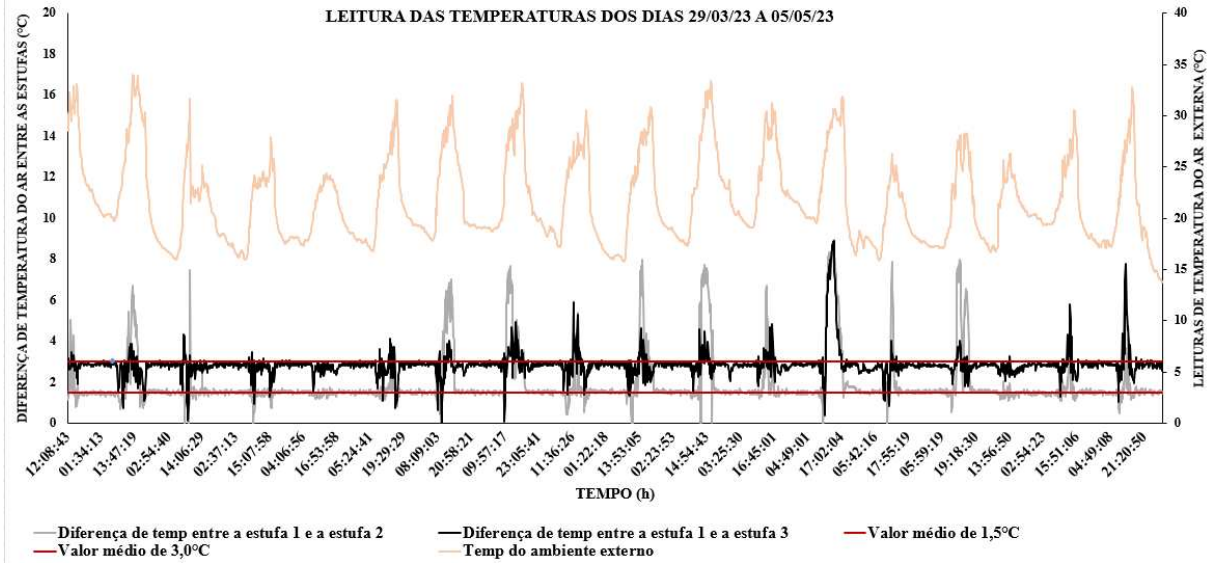
Fonte: Autora.

Os exaustores são acionados quando a diferença de temperatura do ar interna ultrapassa o valor estabelecido de 1,5°C no Gráfico 2 e de 3,0°C no Gráfico 3. Novamente, o comportamento dos exaustores das estufas 2 e 3 indicam que a lógica de programação operou de acordo com o propósito inicial.

### 3.1.2 Avaliação das temperaturas

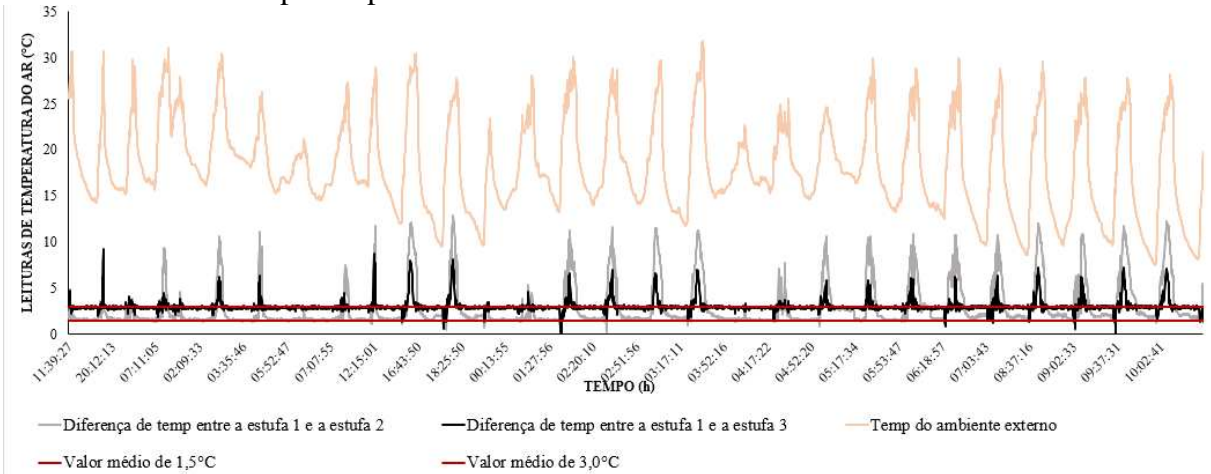
No Gráfico 4 e Gráfico 5 é apresentado a relação entre as curvas da diferença de temperatura interna das estufas com a estufa 1.

Gráfico 4 - Leituras de temperatura do ar para o ambiente externo e a diferença de temperatura do ar entre as estufas para o período de 29/03/23 a 05/05/23



Fonte: Autora.

Gráfico 5 - Leituras de temperatura do ar para o ambiente externo e a diferença de temperatura do ar entre as estufas para o período de 05/05/23 a 09/06/23

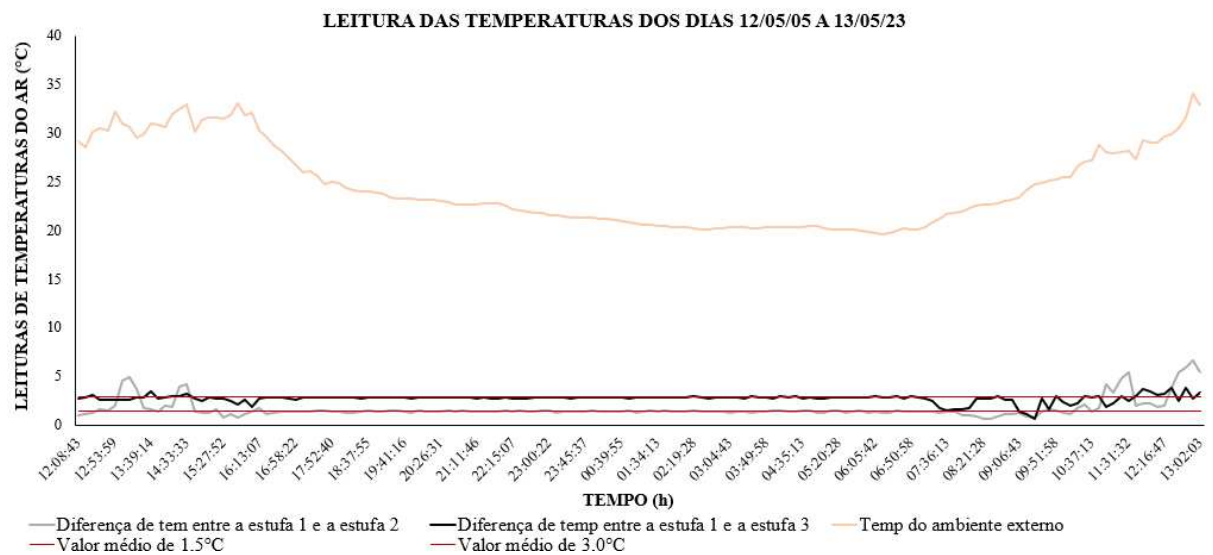


Fonte: Autora.

No Gráfico 6, é apresentado os dados coletados do dia 12/05/23 ao dia 15/05. Observa-se que o sistema apresenta controle esperado das temperaturas do ar no interior das estufas no período do início da noite até o final da manhã, conseguindo se manter dentro dos valores esperados de 1,5°C e 3,0°C. No período da tarde verificou-se picos de temperatura do ar dentro das estufas, principalmente na estufa 2, sendo que tal comportamento também foi observado em experimento similar que realiza automação e controle de uma estufa, tendo a temperatura do ar interna da estufa como uma das variáveis de controle, na Universidade de Hannover na Alemanha (EL GHOUMARI; TANTAU; SERRANO, 2005). Comparando os dados da diferença de temperatura do ar interna das estufas com a temperatura do ar ambiente externo as

estufas, percebe-se que o período em que as temperaturas do ar ultrapassam o valor esperado coincide com os momentos em que a temperatura do ar do ambiente externo está mais elevada, o que reflete uma limitação com relação ao ambiente do sistema. No presente trabalho, as estufas não recebiam radiação solar de modo uniforme, visto que a estufa 3 possuiu um sombreamento a mais em relação as outras estufas. Em uma das laterais da estufa 3 a mata local oferecia um sombreamento na estufa e todas as estufas apresentavam sombreamento, também não uniforme, na parte de trás devido a vegetação florestal do local em que foram construídas. Na Figura 5 é possível observar que houve sombreamento da mata sobre a estufa 3.

Gráfico 6 - Leituras de temperatura do ar para o ambiente externo e a diferença de temperatura do ar entre as estufas para o período de 12/05/23 a 13/05/23



Fonte: Autora.

Figura 5 - Sombreamento causada pela mata local na lateral da estufa 3



Fonte: Autores.

As estufas foram construídas com uma cobertura plástica o que afeta o modo como a radiação solar será transmitida para o interior das estufas, sendo que, a cobertura diminui a incidência da radiação para o seu interior (REBOUÇAS et al., 2015). A radiação também depende do ângulo de incidência, que determinar o quanto do raio será refletido e refratado, além do ângulo, a idade, a cor do material e o tipo de material também influenciam no comportamento da radiação sobre as estufas (REBOUÇAS et al., 2015). O ângulo de incidência reforça a presença de picos de temperatura, principalmente na estufa 2, que foram os momentos em que o Sol se encontrava mais a pino na região e favorável para a transferência de calor pelo filme plástico, aquecendo a estufa mais do que ela é capaz de resfriar.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos períodos de coleta de dados e valores de temperatura internas analisadas.

Tabela 4 – Resultados da estatística discreta para a diferença de temperatura do ar da estufa 1 com a estufa 2 e a diferença de temperatura do ar da estufa 1 com a estufa 3 para ambos os períodos de análise

Análise Estatística	29/03 A 05/05		05/05 A 09/06	
	1,5°C	3,0°C	1,5°C	3,0°C
Média	1,87°C	2,85°C	2,91°C	3,04°C
Desvio Padrão	1,30	0,66	2,43	0,74
Variância	1,70	0,44	5,92	0,55

Fonte: Autora.

Os dados coletados do dia 29/03 ao dia 05/05 foram os que apresentaram o comportamento mais próximo ao desejado, devido a média mais próxima de 1,5 °C. Além dela,

os valores de desvio padrão e variância, apontam que as leituras estão mais próximas da média calculada e mais uniformes, quando comparados com os dados coletados de 05/05 ao dia 09/06.

Uma vez que a segunda proposta de controle de temperatura interna das estufas foi manter a diferença de temperatura entre a estufa 1 e a estufa 3 em 3,0°C, os dados coletados no período do dia 05/05 ao dia 09/06 apresentaram uma média mais próxima do valor desejado, mesmo que o desvio padrão e a variância tenham se apresentados ligeiramente superiores.

Em ambos os períodos, de 29/03 a 05/05 e 05/05 a 09/06, valor de 3,0°C foi a que apresentou melhores valores para o desvio padrão e variância, próximos de zero, o que indica maior uniformidade entre os dados e que estão mais concentrados próximos a média. Tal diferença entre a estatística descritiva dos valores de diferença de temperatura e os dois períodos de análise, também reforça a influência do ambiente externo do local do experimento e a limitação no sistema de exaustão da estufa, visto que os momentos de pico de maior temperatura do ar nas estufas no momento vespertino foram os pontos que mais influenciaram negativamente as análises.

A diferença entre os dados coletados em cada período pode ser novamente fruto de uma limitação de controle do local no qual as estufas foram construídas. Na Tabela 5 estão presentes os dados coletados da estação automática meteorológicas da UFV e disponibilizadas no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para os mesmos períodos de coleta de dados do projeto e para a região de Viçosa/MG.

Tabela 5 - Dados coletados do INMET para os dois períodos de análise

<b>Elemento Climático</b>	<b>29/03 A 05/05</b>	<b>05/05 A 09/06</b>
Radiação média (kJ/m <sup>2</sup> )	1226,57	1109,40
Radiação total (kJ/m <sup>2</sup> )	547.048,90	478.151,80
Chuva (mm)	89,40	8,40
Vento (m/s)	0,60	0,45

Fonte: Autora.

Durante o período de 29/03 a 05/05 de 2023 foram registrados maiores níveis de precipitação quando comparados com o período de 05/05 a 09/06 de 2023, portanto, o segundo período de avaliação contou com menor cobertura de nuvens comparado com o primeiro período avaliado. A radiação registrada pelo INMET foi a radiação global que se trata da soma da radiação direta, da radiação difusa e a radiação de albedo (SOUZA et al., 2018). Sendo que, quanto maior a nebulosidade, maior será a fração da radiação difusa na radiação global registrada (MOOJEN; CAVALCANTE; MENDES, 2012). A radiação difusa trata-se da radiação transmitida após ser espalhada pela atmosfera (SOUZA et al., 2018), devido a presença

de nuvens. Portanto, mesmo que o período do dia 05/05 a 09/06 apresente menor radiação média e total, a menor presença de nuvens contribuiu para o aumento da fração da radiação solar direta que atingiu as estufas no período diurno e contribuiu para o registro de maiores picos de temperatura interna entre as estufas, principalmente no período vespertino.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados da estatística descritiva, mas sem considerar os dados de picos de temperatura do ar observados no Gráfico 4 e Gráfico 5. Eliminados tais dados se observa uma significativa melhora na avaliação em ambos os períodos de coleta. A análise apresentou média de acordo com o valor desejado para a estufa 2 (coluna de 1,5°C), considerando a precisão do sensor de +/- 0,5°C. Os dados para a estufa 3 (coluna de 3,0°C) quase não apresentaram diferença significativa com as análises da Tabela 4 em relação à média, mas houve uma melhora nos dados de desvio padrão e variância. O fato de as médias calculadas para a coluna de 1,5°C em ambos os períodos e a diminuição significativa dos desvios padrões e variâncias quando os momentos de pico de temperatura do ar externo as estufas, reforça o quanto o experimento foi influenciado pelas limitações do local da construção.

Tabela 6 – Resultados da estatística descritiva para ambos os períodos de análise sem as leituras de pico

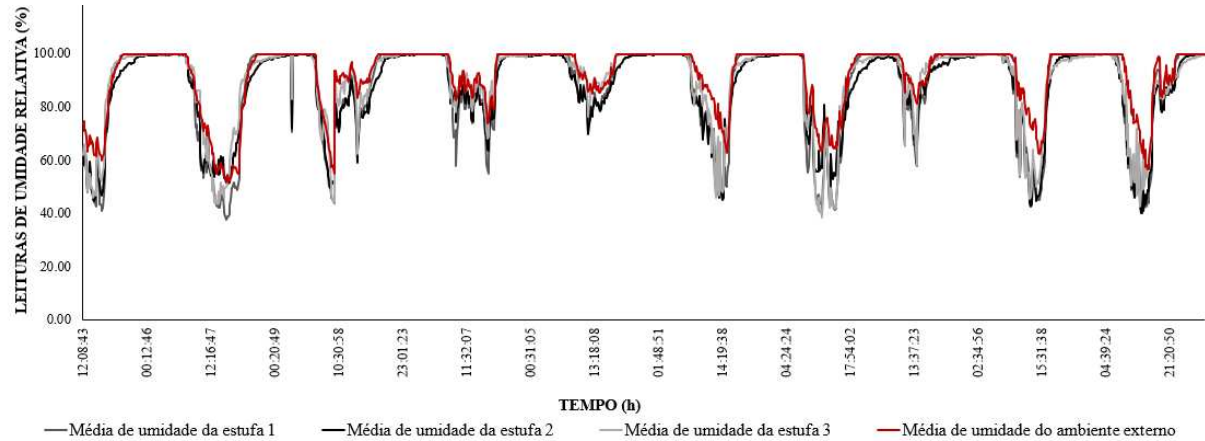
Análise Estatística	29/03 A 05/05		05/05 A 09/06	
	1,5°C	3,0°C	1,5°C	3,0°C
Média	1,50°C	2,80°C	1,81°C	2,92°C
Desvio Padrão	0,31	0,42	0,36	0,38
Variância	0,10	0,17	0,13	0,14

Fonte: Autora.

### 3.2 AVALIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR

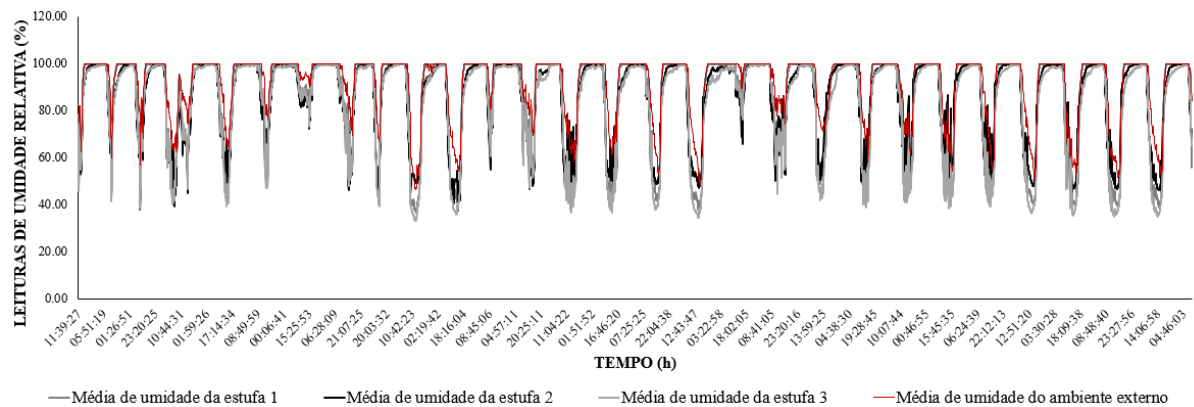
Nos Gráfico 7 e Gráfico 8 são apresentados a umidade relativa do ar no interior das estufas para o período de 29/03/2023 a 05/05/2023 e no Gráfico 8 são os dados para o período de 05/05/23 a 09/06/23.

Gráfico 7 - Leituras de umidade relativa do ambiente externo e de cada estufas para o período de 29/03/23 a 05/05/23



Fonte: Autora.

Gráfico 8 - Leituras de umidade relativa do ambiente externo e de cada estufas para o período de 05/05/23 a 09/06/23



Fonte: Autora.

A tendência é que à medida que a temperatura do ar aumenta, a umidade relativa irá diminuir, sendo esse o comportamento observado no Gráfico 7 e Gráfico 8 (VAREJÃO, 2006). A umidade relativa do interior das estufas foi menor que a umidade do ambiente externo. Pela construção do experimento, as estufas 2 e 3 estavam sempre mais aquecidas que a estufa 1 e a temperatura do ar do ambiente externo, sendo que, no Gráfico 1, é possível perceber que a temperatura interna da estufa 1 se encontra, na maior parte do período avaliado, superior a temperatura do ar do ambiente externo.

Nota-se, pelos Gráfico 7 e Gráfico 8, que a umidade relativa entre as estufas se manteve semelhante, mesmo com a diferença de temperatura do ar. Isso é explicado pelo fato das estufas serem estruturas fechadas e a passagem do vento ser mais limitada pelas escotilhas e pelo acionamento dos exautores. O período da manhã até o início da tarde é o momento em que a umidade apresenta maior oscilação e as menores leituras de umidade (REBOUÇAS et al,2015),

e tal comportamento ocorreu no experimento, com oscilações entre os horários de 7h até as 17h, ou seja, durante o período diurno. Durante a noite, a umidade relativa se mostrou próxima ao valor máximo de 100%. Isso ocorre porque durante o período noturno as temperaturas do ar são mais baixas. Além disso, a cobertura plástica da estufa ajuda a reter o ar úmido, aumentando assim a pressão de vapor d'água no interior das estufas (REBOUÇAS et al., 2015; COSTA, 2003).

### 3.3 AVALIAÇÃO DAS MUDAS

#### 3.3.1 Altura

Na Tabela 7 estão apresentadas as análises estáticas que foram realizadas por meio do software R para a característica da altura das plantas aplicando o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 7 - Altura da planta aos 60 dias de experimento para três cultivares de Coffea arabica sob diferentes condições de estresse hídrico em cada uma das estufas.

Presença de estresse hídrico	Altura de acordo com os cultivares (cm)			Média por estresse hídrico	C.V.%	
	1	2	3		Parcela	Subparcela
<b>Estufa 1</b>						
Não	60,96	61,89	60,02	60,96A <sup>(1)</sup>	8,69%	6,2%
Sim	58,13	62,71	57,42	59,42A		
Média por cultivar	59,54a <sup>(2)</sup>	62,3a	58,72a	-		
<b>Estufa 2</b>						
Não	62,07bA <sup>(1)</sup>	67,95aA	62,80bA	-	6,42%	4,32%
Sim	58,9aA	58,14aB	61,4aA	-		
Média por cultivar	-	-	-	-		
<b>Estufa 3</b>						
Não	65,92	65,5	66,73	66,05A <sup>(1)</sup>	3,41%	6,6%
Sim	59,3	63,50	58,59	60,47B		
Média por cultivar	62,60a <sup>(2)</sup>	64,50a	62,66a	-		

<sup>(1)</sup>Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não se diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>(2)</sup>Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna não se diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autores.

Na estufa 1, que apresentava condições climáticas internas mais próximas ao ambiente externo, a mudança do estresse hídrico aplicado ou o tipo de cultivar utilizado não apresentaram

diferenças significativas pelo teste estatístico aplicado. Entretanto, o coeficiente de variação (CV) para a parcela, ou seja, referente ao estresse hídrico aplicado, foi o maior quando comparado aos CVs das outras estufas e aos CVs das subparcelas, que referem-se ao fator de variedade de cultivar.

Por meio do teste de Tukey, observou-se que a única estufa que apresentou interação significativa entre os fatores para a altura das plantas foi a estufa 2. Portanto, o estresse hídrico e a cultivar tiveram impacto sobre o desenvolvimento das plantas durante o período de avaliação. Dentre os cultivares na estufa 2, o que apresentou maior desenvolvimento sem o estresse hídrico foi o cultivar 2, Catucaí Amarelo 2SL, que, segundo o folder da EMBRAPA (TEIXEIRA, 2018), se trata de um cultivar com plantas de baixo porte e alta produtividade. O cultivar Catucaí Amarelo 2SL, segundo a Embrapa (TEIXEIRA, 2018), apresenta alta exigência de água e, portanto, precisa de irrigação ou de um bom regime de chuvas. Comparando os cultivares dentro do estresse hídrico, o cultivar 2 se mostrou o mais sensível com relação ao estresse hídrico, pois enquanto o cultivar 1 e 3 conseguiam manter um valor médio de altura nos dois regimes hídricos, o cultivar dois apresentou maior diferença de altura entre os dois tratamentos hídricos.

Na estufa 3, o único fator que apresentou diferença significativa foi com relação ao estresse hídrico adotado, no qual todos os cultivares apresentaram maior média de altura quando submetidos ao regime sem o estresse hídrico. Cultivares da espécie *Coffea arábica* se mostram como uma espécie menos resistente ao estresse hídrico, quando comparados espécies como *Coffea canephora* (DAMATTA et al., 2018), o que concorda com a diferença de aproximadamente 0,05 m de altura entre as médias das alturas quando as plantas foram submetidas ao regime com e sem estresse.

### **3.3.2 Número de ramos plagiotrópicos**

Na Tabela 8 está apresentado as análises estáticas que foram realizadas, pelo software R para o número de ramos plagiotrópicos das plantas e aplicando o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 8 - Número de ramos plagiotrópicos em três cultivares de Coffea arabica aos 60 dias de experimento sob diferentes condições de estresse hídrico em cada uma das estufas.

Presença de estresse hídrico	Número de ramos plagiotrópicos de acordo com os cultivares (un)			Média por estresse hídrico	C.V. %	
	1	2	3		Parcela	Subparcela
<b>Estufa 1</b>						
Não	10,42	11,25	11	10,89A <sup>(1)</sup>		
Sim	9,5	10,42	10,67	10,19B		
Média por cultivar	9,96a <sup>(2)</sup>	10,83a	10,83a	-	4,65%	8,33%
<b>Estufa 2</b>						
Não	11	10,92	11,58	11,17A <sup>(1)</sup>		
Sim	9	9,67	11	9,89B		
Média por cultivar	10b <sup>(2)</sup>	10,29ab	11,29a	-	11,74%	9,49%
<b>Estufa 3</b>						
Não	11,17	11,25	11,83	11,47A <sup>(1)</sup>		
Sim	9,83	11,08	10,83	10,58B		
Média por cultivar	10,5a <sup>(2)</sup>	11,17a	11,33a		8,30%	7,47%

<sup>(1)</sup>Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não se diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>(2)</sup>Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna não se diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autores.

Para a característica do número de ramos plagiotrópicos a estufa 1 apresentou diferenciação significativa com relação ao estresse hídrico aplicado. Entretanto, mesmo com a diferença apontada pelo teste de Tukey, a diferença entre o número médio de número de ramos com ou sem estresse hídrico é de menos de uma unidade. O coeficiente de variação para a parcela da estufa 1 foi o menor encontrado para a análise do número de ramos plagiotrópicos.

As cultivares da estufa 2 apresentaram diferença significativa para ambos os fatores avaliados, sendo que nesse caso a cultivar 3, Catucaí Amarelo 24/137, foi a que apresentou o maior número médio de ramos plagiotrópicos. Sabe-se que existe uma correlação genotípica entre o número de pares de ramos plagiotrópicos e o vigor do cultivar de aproximadamente 0,76 (TEIXEIRA et al., 2013). Portanto, considerando a correlação, os cultivares 2 e 3 são os que apresentaram alto vigor vegetativo, segundo o folder da Embrapa (TEIXEIRA, 2018), da EPAMIG café (BOTELHO, 2016) e da Pro Café (FERREIRA, 2017), o que reforçou o melhor desempenho do cultivar 3 na estufa 2. Os coeficientes de variação para essa estufa foram os maiores para a análise do número de ramos plagiotrópicos, tanto para a parcela, quanto para a subparcela, o que indica menor uniformidade entre os dados avaliados.

Na estufa 3, o fator que apresentou diferença significativa foi com relação estresse hídrico aplicado, no qual os cultivares mostraram maior desempenho quando não foram submetidos ao estresse hídrico, reforçando a sensibilidade que os cultivares da *Coffea arabica* com relação a esse fator, como também foi observado na estufa 3 quando foi avaliada a altura das plantas. Nessa estufa foram obtidos os menores coeficientes de variação dentre todos os outros, principalmente para a subparcela.

### 3.3.3 Número de nós no ramo ortotrópico

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados encontrados para o número de nós no ramo ortotrópico das plantas aplicando o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 9 - Número de nós no ramo ortotrópico em diferentes cultivares de *Coffea arabica* aos 60 dias de experimento sob diferentes condições de estresse hídrico em cada uma das estufas

Presença de estresse hídrico	Número de nós no ramo ortotrópico de acordo com os cultivares (un)			Média por estresse hídrico	C.V.%	
	1	2	3		Parcela	Subparcela
<b>Estufa 1</b>						
Não	14,58	16,42	14,75	15,25A <sup>(1)</sup>	13,03%	13,7%
Sim	12,83	14	13,83	13,56B		
Média por cultivar	13,71a <sup>(2)</sup>	15,21a	14,29a			
<b>Estufa 2</b>						
Não	15,83	17,17	16,42	16,47A <sup>(1)</sup>	16,49%	11,53%
Sim	13,42	13,92	14,17	13,83B		
Média por cultivar	14,62a <sup>(2)</sup>	15,54a	15,29a	-		
<b>Estufa 3</b>						
Não	15,33bA <sup>(1)</sup>	16,17abA	18,17aA	-	6,46%	8,99%
Sim	13,25bB	16,25aA	15abB	-		
Média por cultivar	-	-	-	-		

<sup>(1)</sup>Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não se diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>(2)</sup>Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna não se diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autores.

Na avaliação do número de nós no ramo ortotrópico, as estufas 1 e 2 apresentaram comportamento semelhante, no qual o único fator avaliado que apresentou diferença

significativa foi com relação a presença ou não do estresse hídrico. Mesmo com os cultivares não apresentando uma diferença significativa para o teste de Tukey, o cultivar 2 foi o que apresentou melhores números médios de nós nos ramos ortotrópicos.

Na estufa 3, os fatores apresentaram interação significativa entre si. Nessa estufa o cultivar 3 e 2 foram os que apresentaram melhor desenvolvimento quando não submetido ao estresse hídrico. O cultivar 2, diferente do que foi observado na análise da altura, não apresentou diferença significativa com relação ao estresse hídrico, sendo que os outros cultivares apresentaram diferença, principalmente o cultivar 3, o qual se mostrou o mais sensível com relação ao estresse.

### 3.3.4 Diâmetro do ramo ortotrópico

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados encontrados para o diâmetro do ramo principal das plantas aplicando o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 10 - Diâmetro da planta aos 60 dias de experimento para três cultivares de Coffea arabica sob diferentes condições de estresse hídrico para cada uma das estufas

Presença de estresse hídrico	Diâmetro de acordo com os cultivares (un)			Média por estresse hídrico	C.V. %	
	1	2	3		Parcela	Subparcela
<b>Estufa 1</b>						
Não	11,87	11,73	13,05	12,21A <sup>(1)</sup>		
Sim	12,23	12,42	12,21	12,29A	5,79%	9,69%
Média por cultivar	12,05a <sup>(2)</sup>	12,07a	12,63a			
<b>Estufa 2</b>						
Não	13,49	12,24	12,3	12,68A <sup>(1)</sup>		
Sim	11,83	11,96	12,88	12,22A	5,86%	12,58%
Média por cultivar	12,66a <sup>(2)</sup>	12,1a	12,59a			
<b>Estufa 3</b>						
Não	12,97	13	12,7	12,89A <sup>(1)</sup>		
Sim	12,03	12,22	12,15	12,13A	8,23%	6,3%
Média por cultivar	12,5a <sup>(2)</sup>	12,61a	12,42a			

<sup>(1)</sup>Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna não se diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>(2)</sup>Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não se diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autores.

Todas as três estufas os fatores de estresse hídrico e cultivar não apresentaram diferenciação significativa. Sendo assim, a mudança de cultivar ou o estresse hídrico aplicado não influenciaram significativamente no desenvolvimento do diâmetro do caule das plantas. Tal comportamento pode expressar que o tipo de análise estatística aplicada, teste de Tukey, pode não ter sido eficiente para expressar as diferenças encontradas para o diâmetro do caule, ou o diâmetro do caule pode não ser um bom marcador biológico para o efeito da alta temperatura e da seca em plantas de café. Entretanto, o diâmetro do caule é considerado como um bom parâmetro para a identificação de genótipos com melhores respostas ao estresse hídrico rápido e intenso (suspensão da irrigação por 18 dias) em casa de vegetação (SILVA et al., 2022). Apesar da diferença encontrada, as condições de estresse hídrico se diferem de outros estudos realizados pois o estresse foi aplicado de forma gradual e por um período maior (SILVA et al., 2022).

### **3.3.5 Impacto da temperatura nas características avaliadas**

As três estufas apresentaram em média uma diferença de 1,5°C entre si, sendo que a estufa 2 foi a que sofreu mais com as limitações que existiam no local de sua construção e, por isso, apresentou picos de temperatura do ar maiores nos horários vespertinos. Essa limitação fez com que ocorresse, no período da tarde, uma diferença de temperatura do ar com a estufa 1 superior ao valor de 1,5°C

Na análise da altura, tal característica avaliada, apresentou diferença significativa com o aumento da temperatura interna das estufas, comparando as respostas observadas entre as estufas. Em outro experimento desenvolvido de maneira semelhante, com controle e aumento de temperatura em câmaras e com tratamento de água no solo, também foi possível observar o impacto de diferentes níveis de estresse térmico e estresse hídrico sobre o desenvolvimento e crescimento das plantas analisadas (HATFIELD E PRÜGER, 2015). Além disso, a estufa 1 foi a única que não apresentou interação significativa para nenhuma das características, visto que nas estufas 2 e 3 apresentaram interação significativa para as características de altura e no número de nós no ramo ortotrópico, respectivamente. Sendo assim, as estufas 2 e 3 apresentaram em todas as características, exceto com relação ao diâmetro, diferenciação ou interação significativa, o que mostra um reflexo da ação do aumento da temperatura.

A influência da temperatura também é observada comparando a estufa 1 com a estufa 3 da análise da altura das mudas. A diferença de resposta das plantas entre essas estufas,

observadas na Tabela 7, no qual as plantas se diferenciam na estufa 3 de acordo com o estresse hídrico aplicado e na estufa 1 não se diferenciam significativamente, indica que o aumento de temperatura do ar pode ter intensificado o estresse hídrico. Os problemas advindos do estresse hídrico para cultivares de *C. arabica* podem acentuar-se em condições de temperaturas do ar elevadas, por intensificar a perda de água pelas plantas (DAMATTA et al., 2018). Também já foi avaliado o impacto no desenvolvimento e densidade de estômatos nas plantas de café para *Coffea arabica* L. cv. *Icatu* e *C. canephora* cv. *Conilon Clone 153* quando submetidas ao estresse térmico e hídrico em um ambiente com temperatura controlável, também chegou à conclusão de que o aumento de temperatura promoveu limitações em ambas as espécies de café avaliadas (DUBBERSTEIN et al., 2019).

#### 4 CONCLUSÃO

A estrutura com controle e automação da temperatura do ar operou de forma eficiente e de acordo com a lógica de programação desenvolvida para o acionamento dos exaustores. A diferença de temperatura do ar interno entre a estufa 1 e a estufa 2 manteve-se próxima ao valor de 1,5°C, principalmente quando não considerado os horários de pico de temperatura do ar externo as estufas. Já a diferença de temperatura entre a estufa 1 e estufa 3 foi mantida próxima dos 3,0°C, mesmo com nos momentos de pico de temperatura do ar externo e portanto, reforçando o impacto do sombreamento presente na estufa 3. Sendo assim, foi possível simular ambientes de estresse térmico dentro das estufas 2 e 3, com a estufa 1 sendo a referência.

Com a avaliação da umidade relativa do ar no interior de cada estufa foi possível observar que, mesmo existindo a diferença de temperatura do ar interno entre as estufas, a diferença de umidade relativa do ar mais significativa foi quando comparava-se a umidade relativa do ar dentro das estufas com a umidade relativa do ambiente externo as estufas. Essa diferença entre as umidades relativas de dentro e fora das estufas foi mais evidente no período diurno.

Já a avaliação do efeito do ambiente de estresse térmico e hídrico nas plantas de café mostrou que a temperatura do ar é um elemento que proporciona impacto no desenvolvimento das plantas, principalmente nos aspectos como altura, número de ramos plagiotrópicos e números de nós nos ramos ortotrópicos da planta. O estresse hídrico também foi um fator que impactou negativamente o desenvolvimento das plantas o que indica uma necessidade futura de investimentos mais expressivos em irrigação e em cultivares mais tolerantes a menor quantidade de água.

Sugestões para projetos futuros seriam utilizar exaustores com potência maior para que sejam capazes de reduzir os valores da temperatura do ar interno das estufas mesmo nos horários de pico de radiação. Além disso, é interessante uniformizar o sombreamento da mata sobre as estufas.

## REFERÊNCIAS

- BOTELHO, C. E.; PEREIRA, A. A.; ABRAHÃO, J. C. R.; CARVALHO, G. R. **Cultivares de café EPAMIG**. EPAMIG, 2016. Disponível em: [http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/folder/cultivares\\_cafe\\_epamig.pdf](http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/folder/cultivares_cafe_epamig.pdf). Acesso em: 28 de junho de 2023.
- CAMARGO, M. B. P. **The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil**: Review Article. *Bragantia*, Campinas, v.69, n.1, p.239-247, 2010.
- COELHO, J. P.; DE MOURA O. P. B.; CUNHA, J. B. **Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm**. *Computers and electronics in agriculture*, v. 49, n. 3, p. 330-344, 2005.
- COSTA, E. V. **Medidas da umidade relativa do ar em um ambiente fechado**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, p. 346-348, 2003.
- DAMATTA, F. M.; AVILA, R. T.; CARDOSO, A. A.; MARTINS, S. C.; RAMALHO, J. C. **Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A Review**. *J. Agric. Food Chem.* v. 66, p. 5264–5274, 2018.
- DUBBERSTEIN, D.; SEMEDO, J. N.; PARTELLI, F. L.; RODRIGUES, W. P.; RIBEIRO-BARROS, A. I.; LEITÃO, A. E.; SILVA, M. J.; PAIS, I.; RODRIGUES, A. D.; CAMPOSTRINI, E.; SIMÕES-COSTA, M. C.; MOURA, I.; LIDON, F.; Fabio Murilo DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. C. **Impacto do déficit hídrico e do aumento de temperatura nas características estomáticas de Coffea spp**. X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2019.
- EL GHOUMARI, M. Y.; TANTAU, H.J.; SERRANO, J. **Non-linear constrained MPC: Real-time implementation of greenhouse air temperature control**. *Computers and electronics in agriculture*, v. 49, n. 3, p. 345-356, 2005.
- FERREIRA, I. B. **Recomendação Cultivares de Café Arábica**. Fundação Pro Café, 2017. Disponível em: [http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes\\_tecnicas/Cultivares\\_cafe\\_arabica.a.pdf](http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/Cultivares_cafe_arabica.a.pdf). Acesso em: 26 de junho de 2023.
- GIRARDI, G. et al. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Embrapa, Brasília, 2008. Disponível em: [https://www.agritempo.gov.br/climaeagricultura/CLIMA\\_E\\_AGRICULTURA\\_BRASIL\\_300908\\_FINAL.pdf](https://www.agritempo.gov.br/climaeagricultura/CLIMA_E_AGRICULTURA_BRASIL_300908_FINAL.pdf). Acesso em: 7 maio de 2023.
- HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. **Temperature extremes: Effect on plant growth and development**. *Weather and climate extremes*, v. 10, p. 4-10, 2015.
- LIU, T. **Digital-output relative humidity & temperature sensor/module**. Aosong ElectronicsCo., Ltd, 2019. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132459/ETC2/DHT22.html>. Acesso em: 21 de junho de 2023.
- MOOJEN, T. M. B.; CAVALCANTE, R. B. L.; MENDES, C. A. B. **Avaliação da radiação solar com base em dados de nebulosidade**. *Geografia*, Londrina, v. 21, n. 3, p. 41-55, 2012.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS. IPCC: Mudança do Clima, 2023. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf). Acesso em: 05 junho 2023.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS. IPCC: O Oceano e a Criosfera em um Clima em Mudança, 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC\\_mudanca2.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf). Acesso em: 06 maio 2023.

R Core Team (2022). R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REBOUÇAS, P. M.; DIAS, Í. F.; ALVES, M. A.; BARBOSA FILHO, J. A. D. **Radiação solar e temperatura do ar em ambiente protegido**. Revista Agrogeoambiental, v. 7, n. 2, 2015.

SESSO, P. P.; SESSO FILHO, U. A.; PEREIRA, L. F. P. **Dimensionamento do agronegócio do café no Brasil**. Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, DF, v. 38, n. 2. 2021.

SILVA, V. A.; SILVA, V. A.; ABRAHÃO, J. C. D. R.; REIS, A. M.; SANTOS, M. D. O.; PEREIRA, A. A.; BOTELHO, C. E.; CARVALHO, G. R.; CASTRO, E. M.; BARBOSA, J. P. R. A. D.; BOTEGA, G. P.; OLIVEIRA, A. C. B. **Strategy for Selection of Drought-Tolerant Arabica Coffee Genotypes in Brazil**. Agronomy, v. 12, p. 2167, 2022.

SOUZA, M. B.; TONOLO, E. A.; YANG, R. L.; TIEPOLO, G. M.; URBANETZ Jr, J. **Determinação da Irradiação Difusa a Partir da Irradiação Global Horizontal: Estudo para a Cidade de Curitiba**. Smart Energy, v. 5, p. 184-190, 2018.

TEIXEIRA, A. L.; GONÇALVES, F. M. A.; REZENDE, J. C. D.; ROCHA, R. B.; PEREIRA, A. A. **Análise de componentes principais em caracteres morfológicos de café arábica em estádio juvenil**. Coffee Science, Viçosa/MG, v.08, n.2, 2013.

TEIXEIRA, A. L.; CARVALHO, C.; LIMA, G.; FERRO, G. D. O.; ESPINDULA, M.; DIOCLECIANO, J.; LOURENÇO, J. **Cultivar Catucaí Amarelo 2SL: extensão de recomendação para cultivo em Rondônia**. Porto Velho, RO: Embrapa Rondônia, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1097840>. Acesso em: 24 de junho de 2023.

VAREJÃO S. M. A. **Meteorologia e Climatologia: Versão Digital 2**. Recife, Pernambuco, 2006.