

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JOÃO VINICIUS AQUINO DE FERNANDES

**METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA E UMIDADE EM
ESTUFA AGRÍCOLA**

**Alegrete
2023**

JOÃO VINICIUS AQUINO DE FERNANDES

**METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA E UMIDADE EM
ESTUFA AGRÍCOLA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof^a. Dra. Eracilda Fontanela

**Alegrete
2023**

JOÃO VINICIUS AQUINO DE FERNANDES**METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA E UMIDADE EM ESTUFA AGRÍCOLA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Trabalho defendido e aprovado em: 10 de julho de 2023.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Eracilda Fontanela
Orientadora
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. José Gabriel Vieira Neto
(UFPR)

Prof. Dr. Vinicius dos Santos Cunha
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **José Gabriel Vieira Neto, Usuário Externo**, em 17/07/2023, às 17:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **VINICIUS DOS SANTOS CUNHA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2023, às 18:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normas legais aplicáveis.

https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=1300915&infra... 1/2 17/07/2023 23:05 SEI/UNIPAMPA - 1187245 - SISBI/Folha de Aprovação



Assinado eletronicamente por **ERACILDA FONTANELA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2023, às 18:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1187245** e o código CRC **7E76A4D3**.

RESUMO

Com a demanda da utilização do cultivo protegido, surge a necessidade da interligação da cultura vegetal com a tecnologia a fim de otimizar o sistema de automação do controle de temperatura e umidade para garantir um conforto vegetal no final do seu ciclo e uma melhor qualidade do produto final. Foram desenvolvidas três metodologias para a obtenção da temperatura e da umidade interna da estufa agrícola nas dependências da Universidade Federal do Pampa. As metodologias utilizadas foram: um Arduino com linguagem no próprio *software* de livre acesso, um termo-higrômetro de modelo comercial e, um cálculo de balanço de massa e energia. Os dados foram coletados durante vinte dias (dez dias durante o inverno e dez dias durante o verão) com uma amplitude de cinco minutos, ou seja, a cada minuto uma leitura totalizando seis leituras diárias para cada método de obtenção dos dados. Para fins de comparação com os dados de temperatura e de umidade externa da estufa, foram coletados os dados da estação meteorológica automática (estação A826) do Distrito do Passo Novo/RS. Com o trabalho proposto concluiu-se que as três metodologias se assemelharam dentro do período de inverno e dentro do período do verão. E são válidos para se utilizar em um sistema confeccionado com o Arduino através de um sistema comercial.

Palavras-Chave: Arduíno, Cultivo protegido, Termo-higrômetro.

ABSTRACT

The increasing demand for protected cultivation necessitates the integration of plant culture with technology in order to optimize the temperature and humidity control automation system, ensuring plant comfort at the conclusion of its life cycle and enhanced product quality. Three methodologies were developed to obtain the temperature and internal humidity of the agricultural greenhouse at the Universidade Federal do Pampa. The methodologies used were: an Arduino with an open language and free access software; a commercial model thermo-hygrometer, and a mass and energy balance calculation. Data were collected for twenty days (ten days during winter and ten days during summer) with an extent of five minutes, which means one reading every minute, totaling six daily readings for each method of data collection. For comparison purposes with the temperature and humidity data outside the greenhouse, data were collected from the automatic meteorological station (station A826) in the District of Passo Novo/RS. With the proposed work, it was concluded that the three methodologies were similar within the winter period and within the summer period. And they are valid for use in a system made with Arduino through a commercial system.

Keywords: Arduino, Protected crop, Thermo-hygrometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dimensões da estufa a ser utilizada no estudo.....	14
Figura 2. A) Termo-higrômetro com sensor de temperatura e umidade e B) Disposição do termo e Arduino na bancada, durante a leitura de temperatura e umidade no interior da estufa.....	16
Figura 3. Placa microcontrolador Arduino	17
Figura 4. Sensor de umidade e temperatura DHT22.....	17
Figura 5. Arduino e seus componentes, montagem do sensor com as entradas e saídas.....	18
Figura 6. Layout do programa Psicro v1.4 UFRRJ para auxiliar na obtenção das variáveis.	22
Figura 7. Dispositivos dispostos na bancada para obtenção de temperatura e umidade. A) No inverno e B) no verão.....	23
Figura 8. leitura dos dados de temperatura e umidade no software arduino. a) dados das variáveis de temperatura e umidade mês de agosto período de inverno. b) dados das variáveis de temperatura e umidade mês de janeiro período de verão.....	24
Figura 9. Dados da temperatura interna (inverno) do termohigrometro e Arduino na estufa em comparação com a constante do balanço de energia..	28
Figura 10. Dados de temperatura interna (verão) do termohigrometro e Arduino na estufa em comparação com a constante do balanço de energia	28
Figura 11. Variação da umidades e constantes de umidade externa e interna para o mês de agosto período do inverno.	29
Figura 12. Variação das umidades obtidas e constante de umidade externa e interna para o mês de janeiro no periodo do verão.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados climáticos de Alegrete – RS.	14
Tabela 2. Dados médios das condições climáticas referente ao mês de agosto (inverno) durante cinco anos para aplicação da modelagem matemática.....	25
Tabela 3. Dados médios das condições climáticas referente ao mês de janeiro durante cinco anos para aplicação da modelagem matemática.	26
Tabela 4. Dados da temperatura interna no balanço de energia e temperatura externa.	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo geral	10
1.2 Objetivos específicos.....	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 Produção em estufa agrícola	11
2.2 Uso da internet das coisas (microcontrolador Arduino)	12
2.3 Modelagem matemática aplicada à determinação de variáveis ambientais	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Local do estudo	14
3.2 Dados climáticos de Alegrete	15
3.3 Equipamentos para obtenção das variáveis ambientais	16
3.3.1 Termo-higrômetro.....	16
3.3.2 Arduino e seus componentes	17
3.4 Elaboração do protótipo para obtenção dos dados.....	18
3.5 Equações de balanço de energia e massa	18
3.6 Metodologia de coleta de dados arduino e termo-higrômetro.	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 Obtenção dos dados do Arduino.....	24
4.2 Dados obtidos da estação meteorológica para a aplicação da modelagem matemática.....	244
4.3 Modelagem matemática: Temperatura interna da estufa a partir do balanço de energia	26
4.3.1 Temperatura interna e balanço de energia para o mês do inverno e do verão	27
4.3.2 Umidade relativa interna no balanço de massa para o mês do inverno e do verão	27
4.3.3 Dados de umidade interna e umidade relativa interna e externa através do cálculo de balanço de massa para estufa fechada inverno e verão	29
5 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	32
APÊNDICES	35

1 INTRODUÇÃO

O cultivo protegido há séculos vem crescendo com o objetivo de proteger as plantas, de pragas e doenças, das mudanças climáticas. Além disso, o cultivo protegido mantém uma melhor condição no desenvolvimento da cultura em qualquer época do ano.

As casas de vegetação, popularmente conhecidas como estufas, apresentam melhores resultados de produtividade quando comparado com o cultivo não protegido, pois com o controle das variáveis de temperatura e umidade se pode obter um microclima desejado em seu interior para uma cultura específica que não é possível se obter em um cultivo não protegido. Nesse sentido, é indispensável a aferição das variáveis de temperatura e umidade do ar no cultivo protegido e acompanhamento do desenvolvimento da cultura, para assim verificar se a mesma está se desenvolvendo com alto vigor ou apresenta estresse climático.

Quando se fala em estufas agrícolas é preciso realizar uma pesquisa histórica de dados climáticos da região e levar em consideração qual o microclima adequado para as etapas de crescimento da cultura a ser produzida e acompanhar a aferição da umidade e temperatura no interior da estufa.

Na cidade de Alegrete, o tempo nas diferentes estações do ano se modifica drasticamente fazendo com que a temperatura fique elevada, na ordem de 40°C no verão, ou até mesmo com temperaturas negativas no inverno. Em virtude disso, é essencial o uso do cultivo em ambiente protegido, para assim ter um melhor potencial de produtividade.

Para facilitar e auxiliar na manutenção e cuidados no cultivo protegido, existe uma variedade de equipamentos controladores (de temperatura e umidade) disponíveis no mercado, tornando as verificações rápidas e fáceis, como é o caso de um sistema de monitoramento de ambiente por sensores através de controladores programáveis. Existem no mercado controladores comerciais, que geralmente possuem um custo elevado de aquisição pelo produtor rural. Como alternativa, utiliza-se sensores de baixo custo, como termo-higrômetro ou termômetros comuns construídos a baixo custo, a partir do Arduino.

A ferramenta Arduino tem sido empregada em sistemas para determinação de variáveis ambientais de estufas agrícolas, com satisfatórios resultados na aquisição

de dados, além de possível emprego como microcontrolador, podendo ser utilizado no acionamento de equipamentos (FERNANDES et al., 2016; BACON et al., 2020).

A modelagem matemática aplicada ao balanço de energia e massa é uma metodologia utilizada no meio acadêmico, para determinação de temperatura e umidade no interior de estufa agrícola, na qual leva em consideração diversos fatores, como dimensões da estufa, localização, tipo de cultivo e dados climáticos (radiação, temperatura, umidade, velocidade e direção do vento, dentre outros). O método de obtenção da temperatura e umidade relativa internamente à estufa agrícola por modelagem matemática é comprovadamente eficaz (FERNANDES, 2015; VIEIRA NETO, 2015), no entanto, é complexo sua maneira de obtenção, devido à dificuldade e o tempo necessário para a sua determinação.

1.1 Objetivo geral

Determinar e comparar a temperatura e umidade relativa no interior de uma estufa agrícola, através de três metodologias, sendo uma com um termo-higrômetro comercial, outro com um sistema de baixo custo com Arduíno e outro por modelagem matemática.

1.2 Objetivos específicos

- Elaborar um sistema com o microcontrolador Arduino, capaz de determinar a temperatura e a umidade relativa no interior da estufa agrícola, com sensor DHT22;
- Estabelecer valores de temperatura e umidade no interior da estufa para as condições climáticas do verão e do inverno no município de Alegrete, através da modelagem matemática;
- Validar o sistema confeccionado com Arduino através da comparação com um sistema comercial;
- Difundir a utilização dos sistemas de monitoramento do ambiente, dado sua importância frente a produção em cultivo protegido.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Produção em estufa agrícola

A extensão das indústrias de filmes de plástico e telas de *nylon*, inclinou-se em um aumento significativo da agricultura protegida principalmente no cultivo de hortaliças, flores, plantas ornamentais, frutíferas e na produção de mudas (MAKISHIMA et al., 1998).

Com as altas temperaturas e excesso de chuvas, Silva et al. (2014), propuseram a alternativa do cultivo protegido, que possibilita um certo controle das variáveis climáticas, redução os custos com o controle de pragas e doenças.

A partir da evolução e do desenvolvimento relacionado à produção de alimento, a ciência criou outros métodos de produção agrícola. Uma delas são as estufas que tem a importância de proteger as culturas contra os fatores climáticos, assim como doenças e temperaturas extremas, com o propósito de promover condições ideais para o crescimento da planta, a fim de otimizar a transmissão de radiação solar, umidade e temperatura em um ambiente controlado (ELSNER et al., 2000).

Segundo Reis (2005), a escolha do tipo de estufas de plástico depende de vários fatores tais como, características meteorológicas da área de implantação da estufa, espécie de planta a ser cultivada e suas exigências agroclimáticas, disponibilidade de mercado e mão de obra.

A definição de uma estrutura, depende de fatores climáticos tais como chuva, vento, temperatura, umidade relativa, geada ou granizo. Para um microclima adequado referente à cultura selecionada, é necessário dispor de uma pesquisa histórica de dados climáticos da região, além de se obter o conhecimento das tecnologias para uma estrutura segura, eficiente e econômica (MAKISHIMA et al., 1998).

A vantagem do cultivo protegido é a produção de culturas em diferentes épocas do ano, pois com um certo controle do clima no interior da estufa pode-se alcançar grandes eficiências produtivas (PURQUERIO; TIVELLI, 2006).

Baêta e Souza (2012) sustentam que o aquecimento do ar de um ambiente ocorre por incidências de raios solares. Como meio de amenizar esse desconforto é utilizado o deslocamento das massas de ar quente por diferentes formas de ventilação.

De acordo com Purquerio e Tivelli (2006), a redução da radiação solar no interior da estufa em relação ao meio externo da estufa é de 5 a 35%. Isso varia com o tipo de material utilizado no plástico, a estação do ano e a hora.

A utilização de sensores de medidas de temperatura, umidade, concentração de gases, luminosidade, entre outros, são fundamentais para a produção vegetal, pois se tendo o controle destas, torna-se o ambiente ideal para as condições de cada vegetal.

Os sistemas de controles microclimáticos variam de acordo com o fabricante e em função das necessidades apresentadas pelo consumidor. Geralmente os fabricantes de *software* de gerenciamento oferecem junto o *hardware*, sendo necessário a aquisição em conjunto dos mesmos, tornando mais oneroso o sistema (BELEM, 2011).

2.2 Uso da internet das coisas (microcontrolador Arduino)

A internet das coisas (IoT) está presente em diversos avanços tecnológicos que permite que empresas e indústrias do meio diverso possam obter o máximo de proveito das operações e conceitos pelo meio de monitoramento e análise de dados em tempo real. Pensando assim, EVANS (2011) afirma que a IoT só teve o início no momento em que foi conectado à internet as coisas, ou seja, “objetos” e não as pessoas.

O microcontrolador Arduino é uma plataforma eletrônica baseada em *hardware* e *software*, onde as placas leem as entradas (comandos) e transformam em uma saída ativando um motor, ligando um *LED*, com programações bem práticas e de fácil leitura baseado na própria linguagem de programação Arduino (ARDUINO, 2023).

Para Carvalho et al. (2009), a utilização de um microcontrolador em uma estufa é uma maneira para solucionar problemas que afetam o desenvolvimento de plantas, visto que a precisão de um conjunto computacional é incomparável com a atuação humana, sendo assim, a automação objetiva evitar simples erros que poderiam acarretar déficits de produtividade ou qualidade.

2.3 Modelagem matemática aplicada à determinação de variáveis ambientais

O cálculo que envolve o balanço de energia e de massa visa obter implicitamente os valores estimados de temperatura e umidade relativa interna das estufas. Estes fatores devem ser avaliados conforme a variação no modelo e dimensões e nas condições ambientais das estufas. Bojacá et al. (2009), ao compararem uma rede de sensores com modelos matemáticos em estufas com cultivo de rosas na Colômbia, verificaram que os gradientes de temperaturas nos resultados ocorreram devido a presença do cultivo das flores, e, que os dados de ambos os métodos foram próximos.

Sapounas et al. (2008), realizaram a comparação entre métodos matemáticos e sensores na cultura do tomate e concluíram que o gradiente de temperatura fora ocasionado pela movimentação do ar que retira energia dos vegetais. Em ambos os casos, os métodos matemáticos foram satisfatórios quanto à obtenção dos dados, mostrando-se como ferramentas úteis para práticas de gestão e melhoria da produtividade. Entretanto, a presença de uma cultura no interior da estufa ocasiona em variações de temperatura, sendo necessário o cálculo específico do balanço de energia e massa para cada espécie de planta, principalmente por considerar sua evapotranspiração.

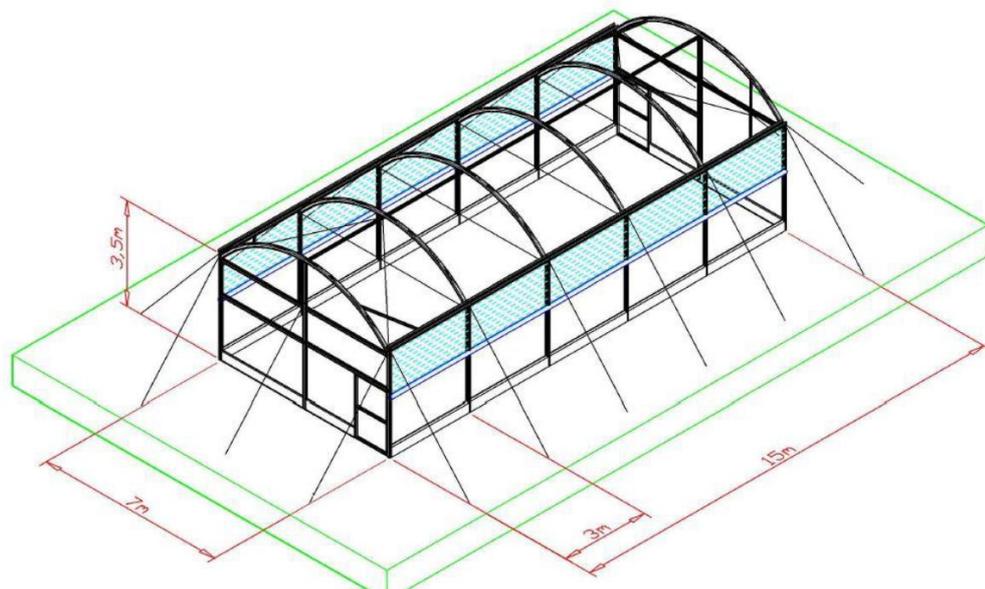
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do estudo

O estudo foi realizado na Universidade Federal do Pampa, nas dependências do Campus Alegrete, localizado na cidade de Alegrete-RS, com as seguintes coordenadas latitude 29°47'33S e longitude 55°46'1W com elevação de 95m.

Para o desenvolvimento desse estudo foi utilizada uma estufa no modelo arco com dimensões conforme ilustrada na Figura 1.

Figura 1. Dimensões da estufa utilizada no estudo.



Fonte: Zanatta Estufas Agrícolas (2014).

A estrutura da estufa é metálica com revestimento em lona de material transparente. Durante o mês de agosto (inverno), a estufa estava sendo utilizada para estudos com a cultura do tomate, enquanto no mês de janeiro (verão) a estufa estava sem uso para o cultivo de plantas.

Para esse trabalho, foi aplicado o uso de um microcontrolador e um sensor modelo DHT22 para determinação dos dados de temperatura e de umidade relativa no interior da estufa. Os dados obtidos através do Arduino armazenados no computador, foram organizados e manipulados para gerar gráficos para melhor representação da distribuição da temperatura e da umidade no interior da estufa, a fim

de comparar com o fator climático externo dos dados (INMET,2023) e assim realizar a modelagem matemática do balanço de energia.

Foram obtidas as temperaturas e as umidades interna da estufa no período especificado durante o inverno e o verão. Logo após, foram obtidos os dados da temperatura e da umidade externa para a realização do cálculo de balanço de energia. Assim, era obtida a temperatura interna da estufa no inverno com a estufa fechada, em caso de condições extrema da estufa. O cálculo foi realizado com auxílio do software VCN- Visual Cálculo Numérico (MAMEDE et al., 2018), para a constante de temperatura interna, pois há necessidade de equação polinomial de grau quatro.

3.2 Dados climáticos de Alegrete

Conforme CLIMATE-DATA (2021), a região em que localiza a cidade de Alegrete-RS apresenta o clima quente e temperado com uma pluviosidade bastante significativa. De acordo com a Köppen-Geiger, e Ayoade (1996), o clima é classificado como Clima subtropical (Cfa), com temperatura média de 19,6 °C e pluviosidade média anual de 1752 mm, conforme médias mensais das variáveis na Tabela 1.

Tabela 1. Dados climáticos de Alegrete - RS.

Variável / mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura média (°C)	25,8	25,1	23,3	20,0	18,2	14,2	13,3	15,1	16,7	19,5	21,7	24,4
Temperatura mínima (°C)	20,9	20,7	18,9	18,0	12,8	10,6	9,4	10,8	12,3	15,0	16,7	19,3
Temperatura máxima (°C)	30,5	29,9	28,2	24,7	20,5	18,5	18,1	20,4	21,9	24,5	25,9	29,5
Precipitação (mm)	147	139	133	178	120	133	127	110	158	220	151	138
Umidade (%)	65	67	70	73	76	80	78	74	73	73	67	64
Horas de sol (h)	10,1	9,4	8,5	7,5	6,4	6,2	6,9	7,8	7,6	8,2	9,9	10,3

Fonte: Adaptado de CLIMATE-DATA, 2021.

3.3 Equipamentos para obtenção das variáveis ambientais

Foram utilizados dois diferentes equipamentos para a obtenção das variáveis ambientais no interior da estufa agrícola: um termo-higrômetro, um microcontrolador Arduino. Para isso, foi realizado um resumo dos dados climáticos referentes ao mês de coleta das leituras durante os últimos cinco anos afim de realizar a modelagem matemática e, por fim, comparar os dados coletados no interior da estufa com as variáveis da temperatura externa de acordo com a estação meteorológica local. A obtenção das variáveis ocorreu pela estação meteorológica do Distrito de Passo Novo/RS (INMET, 2023) com as médias dos últimos cinco anos.

Os dados internos da estufa foram coletados no verão e no inverno. No verão, o mês selecionado foi janeiro e no inverno, o mês selecionado foi agosto. Através destes dados coletados foi confeccionado o cálculo de balanço de energia e massa.

3.3.1 Termo-higrômetro

O termo-higrômetro, modelo comercial (Figura 2A), ficou disposto em um ponto fixo e estratégico da estufa (Figura 2B), posicionado no centro da estufa, na altura de um (1) metro do solo a fim de fazer a leitura de temperatura e de umidade juntamente com o Arduino.

Figura 2. A) Termo-higrômetro com sensor de temperatura e umidade e B) Disposição do termo-higrômetro e Arduino na bancada, durante a leitura de temperatura e umidade no interior da estufa.



Fonte: TecnoFerramentas (2022) e Autor (2022).

3.3.2 Arduino e seus componentes

O componente microcontrolador Arduino Uno (Figura 3) foi empregado para coleta e armazenamento de dados de temperatura e umidade no interior da estufa, dada sua versatilidade e facilidade no manuseio.

Figura 3. Placa microcontrolador Arduino.



Fonte: Arduino (2023).

A placa Arduino pode ser adquirida comercialmente e é possível encontrar diferentes modelos, entretanto suas funcionalidades e componentes são semelhantes.

O sensor definido foi o modelo DHT22 de umidade e temperatura, que foi integrado junto a placa Arduino conforme Figura 4.

Figura 4. Sensor de umidade e temperatura DHT22.

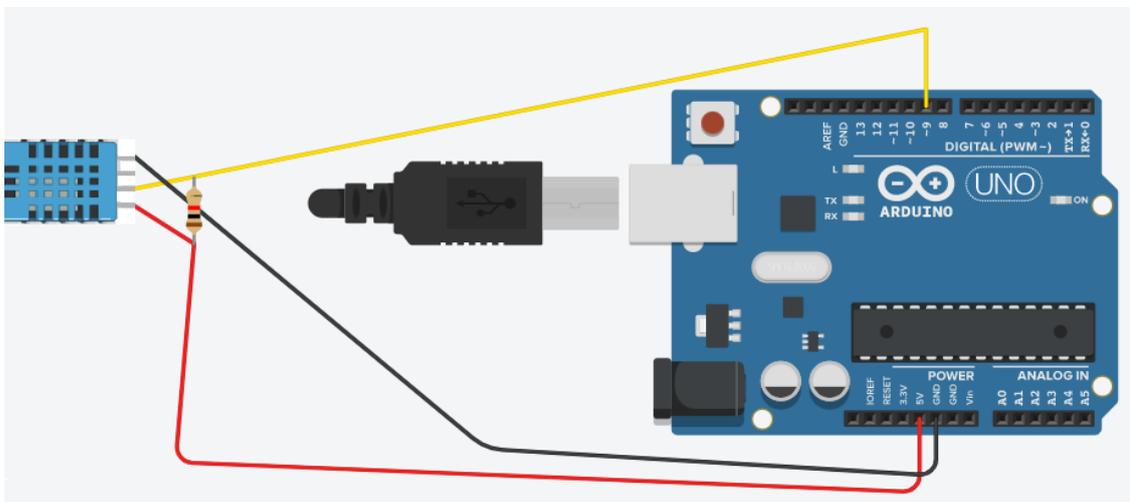


Fonte: ArduinoÔmega (2022).

3.4 Elaboração do protótipo para obtenção dos dados

Este trabalho foi desenvolvido com o auxílio do site Autodesk Tinkercad (2023), o circuito do microcontrolador com o resistor e o sensor DHT22, conforme figura 5. O Arduino é equipado com um resistor de 10k ohms (Ω), com o circuito vermelho com voltagem de 5 volts de operação, com voltagem de entrada de 9v representado pela cor amarela e o negativo representado na cor preta e o sensor DHT22.

Figura 5. Arduino e seus componentes, montagem do sensor com as entradas e saídas.



Fonte: Autodesk Tinkercad (2023).

O código de programação pelo programa do Arduino (Apêndice A) foi desenvolvido a partir do site Robocore (2022), onde é encontrada a biblioteca do código com as especificações. Na própria plataforma do software (ARDUINO, 2023) foi realizado o seguimento do código para a obtenção das variáveis.

3.5 Equações de balanço de energia e massa

No cálculo do balanço de energia, devido às considerações que deverão ser feitas para as condições da estrutura, será utilizado o método de balanço proposto por Hellickson & Walker (1983) e ASHRAE (1978), na qual visa obter o valor de temperatura interna da estufa (T_i). De forma geral, o balanço de energia é definido como a diferença entre o ganho e a perda de calor sensível para um determinado

meio, em condições estáveis, sendo que a equação de balanço proposta pelos autores citados é apresentada na Equação 1.

$$Q_{rad} + Q_{equ} + Q_{aqu} + Q_{resp} = Q_{cnd} + Q_{pis} + Q_{ven} + Q_{inf} + Q_{rtc} + Q_{fot} + Q_{sl} \quad (1)$$

Em que:

Q_{rad} = calor sensível proveniente do sol – radiação (W);

Q_{equ} = calor de fontes da energia térmica proveniente de motores, equipamentos, luminárias, pessoas, etc. (W);

Q_{aqu} = calor sensível do sistema de aquecimento (W)

Q_{resp} = calor sensível de respiração do produto (W);

Q_{cnd} = calor sensível de condução da estrutura (W);

Q_{pis} = calor sensível transferido do (ao) solo ou do (ao) pelo perímetro (W);

Q_{ven} = calor sensível do ar de ventilação (natural ou mecânica) (W)

Q_{inf} = calor sensível de infiltração involuntária pelas frestas (W) – considerado 0;

Q_{rtc} = calor de reirradiação térmica para o céu (W);

Q_{fot} = calor sensível usado para fotossíntese (W);

Q_{sl} = calor sensível convertido em calor latente dentro do espaço interno (W).

Cada termo que compõe a Equação 1 foi definido de acordo com as equações seguintes de 2 a 11.

$$Q_{rad} = \zeta * I * A_p \quad (2)$$

Em que:

ζ = transmitância do material de cobertura (PEBD 0,92);

I = intensidade da radiação solar local ($W m^{-2}$);

A_p = Área de piso da casa de vegetação (m^2).

$$Q_{fot} = 0,003 * Q_{rad} \quad (3)$$

$$Q_{ven} = 0,03 * Q_{fot} \quad (4)$$

$$Q_{ven} = Q_{sv} + Q_{sl} \quad (5)$$

$$Q_{sv} = V * \rho_{ar} * C_p * \Delta T \quad (6)$$

$$V = Vv * EA * Aabert \quad (7)$$

$$Qsl = E * Fc * Qrad \quad (8)$$

Em que:

V = fluxo mássico ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

C_p = Calor específico do ar ($1006 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

ΔT = Diferença entre a temperatura interna - T_i e a temperatura externa - T_e (K);

ρ_{ar} = Densidade do ar (kg m^{-3});

Vv = taxa de ventilação volumétrica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

EA = Eficiência das aberturas (0,35);

$Aabert$ = Área de abertura (m^2);

E = Razão da evapotranspiração e radiação solar;

Fc = Fator de cultivo.

$$Qcnd = U * Acob * \Delta T \quad (9)$$

Em que:

U = coeficiente global de transferência do material de cobertura ($6,8 \text{ W. m}^{-2} \text{ K}^{-1}$);

$Acob$ = Área do contorno por plástico da estufa (m^2).

$$Qpis = F * Per * \Delta T \quad (10)$$

Em que:

F = Fator perimetral;

Per = Perímetro da estufa coberta (m);

$$Qrtc = \epsilon_{sup} * \gamma T * \sigma * Ap * (T_i^{-4} - \epsilon_{ar} * T_e^4) \quad (11)$$

Em que:

ϵ_{sup} = Emissividade da superfície interna (0,85);

γT = Transmitância térmica do material de cobertura (0,80);

σ = Constante de Stephan Boltzmann ($5,678 \times 10^{-6} \text{ W. m}^{-2} \text{ K}^{-4}$);

T_i = Temperatura interna (K);

T_e = Temperatura externa (K);

ε_{ar} = Emissividade aparente da atmosfera (tabelado de Hellickson e Walker (1983) que depende da temperatura do ponto de orvalho do céu = 0,837);

A_p = Área do piso (m^2).

Para a utilização do modelo apresentado, utilizou-se de condições de contorno para as diferentes simulações, sendo:

- Para estruturas fechadas no verão, considerou-se:

$$Q_{equ} = Q_{aqu} = Q_{sve} = Q_{sv} = 0 \quad (12)$$

- Para estruturas abertas ou semiabertas, para a situação de verão, têm-se:

$$Q_{equ} = Q_{aqu} = Q_{cnd} = 0 \quad (13)$$

- Em estruturas fechadas na condição de inverno, considerou-se:

$$Q_{rad} = Q_{fot} = Q_{sv} = Q_{sl} = 0 \quad (14)$$

- Em estruturas totalmente abertas ou semiabertas, para a situação de inverno, têm-se:

$$Q_{aqu} = Q_{rad} = Q_{fot} = Q_{per} = Q_{sl} = Q_{cnd} = 0 \quad (15)$$

O balanço de massa, calculado para as estruturas nas condições fechadas, aplicou-se a Equação 16, para determinar a umidade relativa interna.

$$UR_i = \left(\frac{100}{A_{cont} + A_{pm}} \right) * (A_{pm} + (pW_{se} * \frac{A_{cont}}{pW_{si}})). \quad (16)$$

Em que:

A_{pm} = Área do piso molhado (m^2);

A_{cont} = Área do contorno da casa de vegetação (m^2);

pW_{se} = Pressão de saturação referente à temperatura externa;

pW_{si} = Pressão de saturação referente à temperatura interna.

A pressão de saturação referente à temperatura externa e interna, utilizadas na equação 16, foram obtidas com o auxílio de um programa Psicro v1.4 da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ (PSICRO, 2001), com dados de temperatura

de bulbo seco externa, de temperatura simulada internamente da casa de vegetação e de umidade relativa externa na altitude barométrica de Alegrete.

Para o balanço de massa, com as condições de estufa fechada, foi realizado a constante de umidade relativa interna da estufa com o auxílio do software Psicro (2001), (Figura 6), para a estimativa da pressão de saturação externa e interna na altitude barométrica e temperatura de bulbo úmido (TBU).

Figura 6. Layout do programa Psicro v1.4 UFRRJ para auxiliar na obtenção das variáveis.

Fonte: Psicro (2001).

3.6 Metodologia de coleta de dados Arduino e termo-higrômetro

Os valores foram coletados na parte interna da estufa conforme os dispositivos citados acima que são: o termo-higrômetro, o Arduino e o modelo matemático. Com o auxílio do site INMET (2023), foram obtidos os dados externos pela estação meteorológica automática, localizada no distrito de Passo Novo, município de Alegrete.

Preliminarmente foi realizada a leitura da temperatura e da umidade interna da estufa no período de 09 de agosto de 2022 até 18 de agosto de 2022 no horário das 8 horas da manhã, totalizando 10 dias. As leituras ocorreram em intervalo de um minuto, totalizando seis repetições, tanto para o Arduino juntamente com sensor DHT-22, quanto para o termo-higrômetro modelo comercial (Apêndice D).

A segunda etapa da obtenção das coletas de temperatura e da umidade interna da estufa foi no período de 04 de janeiro de 2023 até 13 de janeiro de 2023, no horário das 15 horas, totalizando 10 dias. As leituras foram realizadas com intervalo de um minuto, totalizando seis repetições para cada metodologia: Arduino sensor DHT-22 e termo-higrômetro modelo comercial.

Na figura 7A, é possível visualizar os componentes dispostos no interior da estufa durante a coleta do mês de agosto de 2022 em temperatura de inverno, enquanto a Figura 7B refere-se a coleta do mês de janeiro, durante o verão.

Figura 7. Dispositivos dispostos na bancada para obtenção da temperatura e umidade A) no inverno e B) no verão



Fonte: Autor (2022).

Após a coleta dos dados, foram elaborados gráficos que apresentam o comportamento da temperatura e da umidade interna em relação a variação externa, bem como, as tendências de valores de temperatura e de umidade pelos três métodos de obtenção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Obtenção dos dados do Arduino

Na figura 8 estão dispostos os dados de temperatura e de umidade pelo Arduino referente ao mês de agosto (Figura 8A) e janeiro (Figura 8B), respectivamente com intervalo de leitura de 20 segundos.

Figura 8. Leitura dos dados de temperatura e umidade no software Arduino. A) Dados das variáveis de temperatura e umidade mês de agosto período de inverno. B) Dados das variáveis de temperatura e umidade mês de janeiro período de verão

A) Agosto (Inverno)			B) Janeiro (Verão)		
07:59:41.949	-> Temperatura: 15.80 °C	Umidade: 91.80 %	16:00:07.447	-> Temperatura: 33.90 °C	Umidade: 35.30 %
08:00:01.960	-> Temperatura: 15.90 °C	Umidade: 91.60 %	16:00:27.484	-> Temperatura: 35.00 °C	Umidade: 36.00 %
08:00:21.986	-> Temperatura: 16.00 °C	Umidade: 91.60 %	16:00:47.485	-> Temperatura: 36.80 °C	Umidade: 42.80 %
08:00:42.047	-> Temperatura: 16.00 °C	Umidade: 91.60 %	16:01:07.545	-> Temperatura: 38.70 °C	Umidade: 40.00 %
08:01:02.070	-> Temperatura: 16.10 °C	Umidade: 91.60 %	16:01:27.586	-> Temperatura: 40.60 °C	Umidade: 38.20 %
08:01:22.076	-> Temperatura: 16.10 °C	Umidade: 91.40 %	16:01:47.605	-> Temperatura: 42.60 °C	Umidade: 37.40 %
08:01:42.098	-> Temperatura: 16.20 °C	Umidade: 91.40 %	16:02:07.643	-> Temperatura: 44.20 °C	Umidade: 35.90 %
08:02:02.132	-> Temperatura: 16.20 °C	Umidade: 91.30 %	16:02:27.663	-> Temperatura: 45.60 °C	Umidade: 34.30 %
08:02:22.173	-> Temperatura: 16.30 °C	Umidade: 91.30 %	16:02:47.740	-> Temperatura: 46.90 °C	Umidade: 31.80 %
08:02:42.213	-> Temperatura: 16.40 °C	Umidade: 91.30 %	16:03:07.749	-> Temperatura: 47.60 °C	Umidade: 31.10 %
08:03:02.244	-> Temperatura: 16.40 °C	Umidade: 91.20 %	16:03:27.788	-> Temperatura: 48.40 °C	Umidade: 30.20 %
08:03:22.290	-> Temperatura: 16.50 °C	Umidade: 91.20 %	16:03:47.835	-> Temperatura: 48.90 °C	Umidade: 29.90 %
08:03:42.290	-> Temperatura: 16.50 °C	Umidade: 91.10 %	16:04:07.848	-> Temperatura: 49.60 °C	Umidade: 29.80 %
08:04:02.335	-> Temperatura: 16.40 °C	Umidade: 91.20 %	16:04:27.893	-> Temperatura: 50.10 °C	Umidade: 29.70 %
08:04:22.349	-> Temperatura: 16.50 °C	Umidade: 91.20 %	16:04:47.917	-> Temperatura: 47.60 °C	Umidade: 31.70 %
08:04:42.379	-> Temperatura: 16.50 °C	Umidade: 91.20 %	16:05:07.994	-> Temperatura: 45.30 °C	Umidade: 33.90 %
08:05:02.429	-> Temperatura: 16.60 °C	Umidade: 91.20 %	16:05:28.003	-> Temperatura: 43.50 °C	Umidade: 38.30 %
08:05:22.430	-> Temperatura: 16.70 °C	Umidade: 91.10 %	16:05:48.045	-> Temperatura: 42.10 °C	Umidade: 41.10 %
08:05:42.486	-> Temperatura: 16.70 °C	Umidade: 91.00 %	16:06:08.089	-> Temperatura: 40.90 °C	Umidade: 43.50 %
08:06:02.507	-> Temperatura: 16.80 °C	Umidade: 90.50 %	16:06:28.124	-> Temperatura: 39.80 °C	Umidade: 41.90 %
08:06:22.545	-> Temperatura: 16.90 °C	Umidade: 90.60 %	16:06:48.161	-> Temperatura: 38.90 °C	Umidade: 42.30 %
			16:07:08.175	-> Temperatura: 39.00 °C	Umidade: 46.60 %
			16:07:28.213	-> Temperatura: 37.20 °C	Umidade: 42.20 %
			16:07:48.262	-> Temperatura: 36.50 °C	Umidade: 47.80 %
			16:08:08.322	-> Temperatura: 35.80 °C	Umidade: 44.00 %
			16:08:28.362	-> Temperatura: 35.20 °C	Umidade: 42.80 %

Fonte: Autor,2023.

Nota-se que no período do verão o horário está uma hora atrasado por conta da atualização do software Arduino. As leituras foram dadas de 20 em 20 segundos podendo alterar o tempo de leitura na sua linguagem de programação.

4.2 Dados obtidos da estação meteorológica para a aplicação da modelagem matemática

Na tabela 2 estão dispostos os valores médios, durante os últimos cinco anos (2018 a 2022), para o mês de agosto, de pressão atmosférica ao nível da estação, da

radiação global, da temperatura do ar (bulbo seco), da temperatura do ponto de orvalho e da umidade relativa do ar. Com esses dados da temperatura externa (INMET, 2023) foram realizados os cálculos de balanço de massa e de energia, além de serem utilizados também como forma de comparação dos resultados com o ambiente protegido.

Tabela 2. Dados médios das condições climáticas referente ao mês de agosto (inverno) durante cinco anos para aplicação da modelagem matemática

Mês Agosto	Horário	Pressão Atmosférica ao Nível da Estação, Horaria (Mb)	Radiação Global (Kj/m ²)	Temperatura do Ar - Bulbo Seco, Horária (°C)	Temperatura do Ponto de Orvalho (°C)	Umidade Relativa do Ar, Horária (%)	Temperatura Mínima na Hora Ant. (Aut) (°C)
2018	08:00	1003,46	44,29	9,15	7,67	90,84	8,83
2019	08:00	1003,39	44,51	9,95	8,36	90,30	9,60
2020	08:00	1003,28	61,74	9,94	8,34	90,23	9,57
2021	08:00	1003,38	62,72	9,89	8,23	89,96	9,51
2022	08:00	1002,11	65,02	11,26	9,10	87,22	10,95
Média inverno		1003,12	55,66	10,04	8,34	89,71	9,69

Fonte: INMET (2023).

Conforme os dados apresentados na Tabela 2, os resultados da média geral dos cinco anos referente ao mês de agosto (inverno), é possível aplicar o cálculo da modelagem matemática através da equação de balanço de energia e massa para assim obter os dados de temperatura e umidade relativa interna da estufa.

Na tabela 3 estão dispostos os valores médios, durante os últimos cinco anos (2018 a 2022), para o mês de janeiro, das variáveis de pressão atmosférica ao nível da estação, da radiação global, da temperatura do ar (bulbo seco), da temperatura do ponto de orvalho e da umidade relativa do ar.

Quando analisados os valores das variáveis referente ao mês de janeiro (verão), os mesmos se assemelham com a região de Alegrete (CLIMATE-DATE, 2021) e através desses, é possível aplicar o cálculo da modelagem matemática através da equação de balanço de energia e massa para assim obter os dados de temperatura e umidade relativa interna, para fins de comparação com o termo-higrômetro e com o Arduino.

Tabela 3. Dados médios das condições climáticas referente ao mês de janeiro durante cinco anos para aplicação da modelagem matemática

Mês Janeiro	Horário	Pressão Atmosférica ao Nível da Estação, Horária (Mb)	Radiação Global (Kj/m ²)	Temperatura do Ar - Bulbo Seco, Horaria (°C)	Temperatura do Ponto de Orvalho (°C)	Umidade Relativa do Ar, Horaria (%)	Temperatura Mínima na Hora Ant. (Aut) (°C)
2019	15:00	1003,36	2536,70	27,95	21,93	71,10	26,78
2020	15:00	1003,21	2961,56	28,70	18,45	55,39	27,13
2021	15:00	1002,58	3052,43	28,45	19,56	60,71	27,11
2022	15:00	1003,78	3299,48	32,19	17,49	43,42	30,53
2023	15:00	993,60	3086,76	32,00	15,58	46,40	28,59
média verão		1001,31	2987,39	29,86	18,60	55,40	28,03

Fonte: INMET (2023).

4.3 Modelagem matemática: Temperatura interna da estufa a partir do balanço de energia

O balanço de energia foi obtido a partir das equações (1 a 15) e está mostrada no Apêndice B, com os valores da constante da temperatura interna no período do verão e do inverno e com as cortinas da estufa fechadas.

Algumas equações foram desconsideradas pois o valor da velocidade do vento é considerado zero por conta das cortinas estarem fechada. Dessa forma, a temperatura interna da estufa no período de verão foi de 57,01°C.

Os valores das variáveis no período de verão (Apêndice C) mudam, entretanto, alguns valores são os mesmos para as dimensões da estufa e para os valores de constantes. A constante de temperatura interna da estufa para o período de inverno foi 7,91°C.

A tabela 4 apresenta os dados da temperatura interna no balanço de energia e temperatura externa para fins de comparação dos valores da temperatura externa via INMET (2023) no inverno e no verão.

Tabela 4: Dados da temperatura interna no balanço de energia e temperatura externa

Temperatura interna (T.I) no balanço de energia	T.I (°C)	Temperatura externa (°C)
verão	57,01	28,03
Inverno	7,91	9,69

Fonte: Autor (2023).

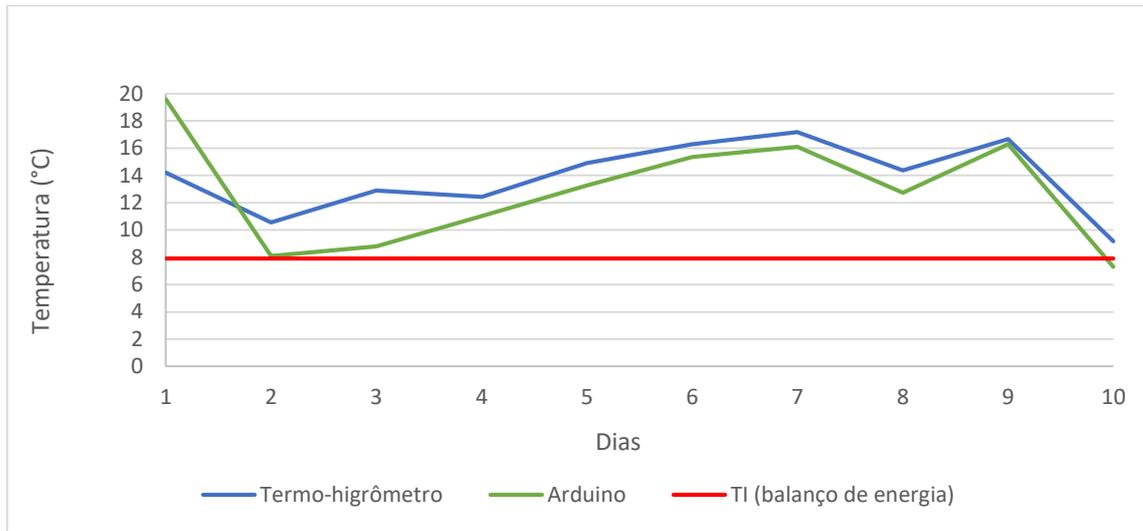
4.3.1 Temperatura interna e balanço de energia para o mês do inverno e do verão

A umidade relativa interna da estufa através do balanço de massa para o período de inverno foi de 89,63%, comparando com a umidade externa, obtida via INMET, foi de 89,71%. No período do verão a umidade relativa interna da estufa foi de 56,96% enquanto a umidade externa foi de 55,4%. Conforme Hellickson & Walker (1983), esses resultados, quando aplicadas as equações e comparados, é aceitável pois são valores bem próximos, vale ressaltar que foram obtidos uma média externa de vários anos para comparar com a umidade relativa interna da estufa por apenas um curto período de tempo.

4.3.2 Umidade relativa interna no balanço de massa para o mês do inverno e do verão

As temperaturas internas da estufa no período do inverno e a constante do balanço de energia estão representadas na figura 9. Observa-se que o Arduino e o termo-higrômetro registraram valores semelhantes em alguns dias, mas estão distantes do TI (balanço de energia) – visualizada no gráfico através da linha vermelha – onde TI é a constante de temperatura interna do balanço de energia que é representado pelo extremo da temperatura interna representados a partir da Equação 1.

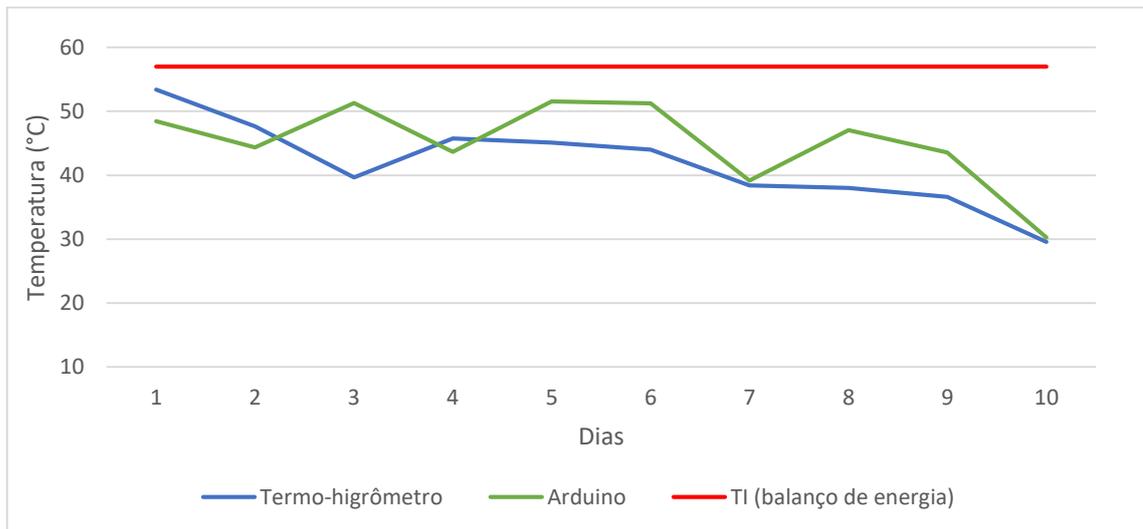
Figura 9. Dados da temperatura interna (inverno) do termo-higrômetro e Arduino na estufa em comparação com a constante do balanço de energia



Fonte: Autor (2023).

Os dados obtidos de temperatura para o período do verão estão representados na figura 10.

Figura 10. Dados de temperatura interna (verão) do termo-higrômetro e Arduino na estufa em comparação com a constante do balanço de energia



Fonte: Autor (2023).

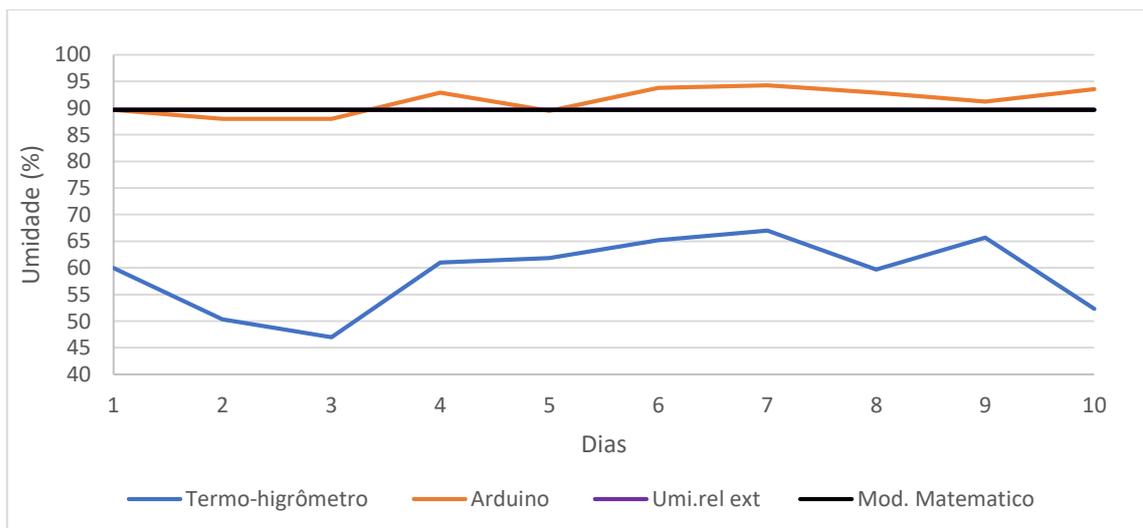
Observa-se que os dados registrados de temperatura coletadas do termo-higrômetro e Arduino no período de verão em nenhum momento se aproximam da temperatura interna de TI (balanço de energia), representados pela linha vermelha. O

Arduino e o termo-higrômetro quando comparados os seus comportamentos, seus valores se assemelham, entretanto no dia 3 há uma divergência em questão, onde cada variável distancia um do outro. Quando comparados, podemos observar que o Arduino se sobressai em questão do termo-higrometro mas ambos atendem as obtenções de temperatura. Conforme Silva et al. (2003), a temperatura no ambiente protegido com o filme de polietileno tende a ser crescente nos horários das 15 horas no período de verão e a temperatura interna será superior à externa. Nesse caso, é recomendado realizar a abertura das paredes laterais da estufa para um melhor conforto térmico vegetal.

4.3.3 Dados de umidade interna e umidade relativa interna e externa através do cálculo de balanço de massa para estufa fechada inverno e verão

Na figura 11 é possível visualizar a umidade interna e o balanço de energia e massa com as umidades internas representado pela linha preta como modelo matemático e umidade relativa externas da estufa em comparação com o Arduino e o termo-higrômetro.

Figura 11. Variações das umidades e constantes de umidade externa e interna para o mês de agosto período inverno

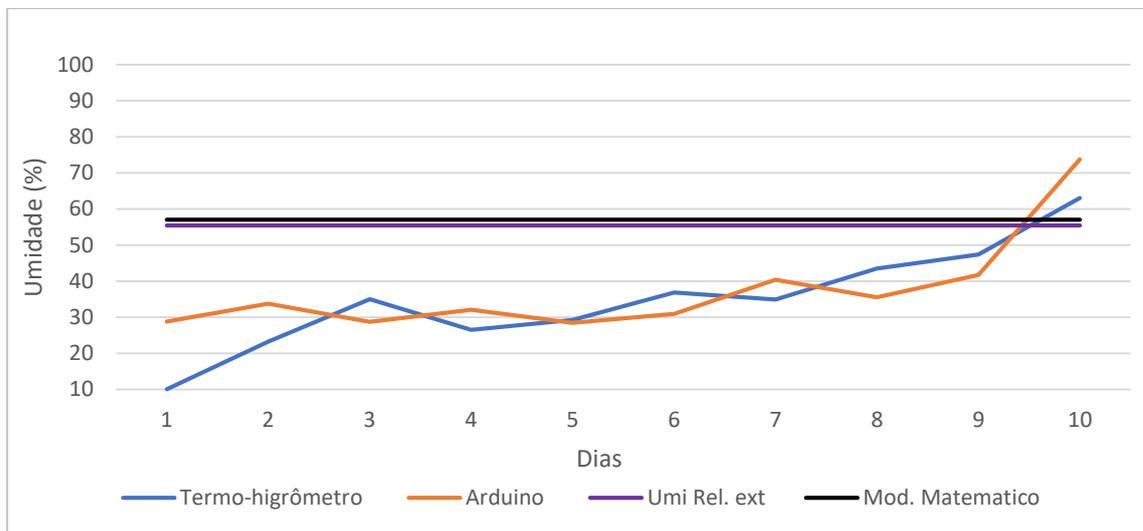


Fonte: Autor (2023).

Verifica-se que a umidade do Arduino condiz com a umidade relativa interna (modelo matemático) e a umidade externa da estufa. Os valores de umidade relativa interna e externa são bem próximos. Por conta dessa proximidade, a linha roxa não fica visível no gráfico. Neste caso o termo-higrômetro mostrou valores bem diferentes em comparação com o Arduino.

Na figura 12 está disposta a umidade interna e externa da estufa (INMET, 2023) comparando com o Arduino e o termo-higrômetro.

Figura 12. Variações das umidades obtidas e constante de umidade externa e interna para o mês de janeiro (verão)



Fonte: Autor (2023).

Conforme a figura 12 é possível observar as constantes de umidade relativa interna através da linha preta (modelo matemático) e umidade relativa externa da estufa por meio do cálculo realizado pelo balanço de massa, em que a cortina da estufa se encontrava fechada. As variáveis aplicadas do Arduino e o termo-higrômetro se assemelham, em dias intensos à temperatura e somente no dia 10 as variáveis se encontram com as constantes. Vale ressaltar que os valores obtidos pelos modelos matemáticos, para balanço de massa de energia, é evidenciado pelos valores extremos.

5 CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível concluir que tanto o microcontrolador Arduino juntamente com o sensor DHT22 e o termo-higrômetro são capazes de suprirem a demanda no controle de uma estufa agrícola, Em comparação com o termo-higrometro o Arduino se destaca-se como melhor, entretanto ambos atendem à demanda de obtenção de umidade e temperatura.

O cálculo de balanço de energia e massa se satisfazem com os dados apresentados pelo microcontrolador Arduino e pelo termo-higrômetro e os valores de temperatura e umidade são semelhantes para ambos os métodos.

Os três métodos para a obtenção de temperatura e umidade no interior da estufa podem ser aplicados e aperfeiçoados usando uma alternativa de automação de estufas agrícolas de baixo custo.

Para estudos futuros indica-se realizar coleta de dados durante um mês e em quatro diferentes situações: cortina fechada e aberta no verão e cortina fechada e aberta no inverno, para ter uma melhor percepção e estudo de caso.

Com o intuito de aprimorar o conforto térmico vegetal não se aconselha deixar as cortinas fechadas em dias muito quente no período de verão e é sugerível a instalação de ventiladores ou resfriador evaporativo.

O uso de um microcontrolador ESP 32 que compõe uma placa *Wi-Fi* e *BlueTooth* facilitaria o processo de obtenção e armazenamento de dados na casa de vegetação, pois o seu manuseio passa a ser remoto e em tempo real.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO ÔMEGA, 2022. Disponível em < <https://www.arduinoomega.com/> >. Acesso em 10 de fev. de 2022.
- ARDUINO, 2023. Disponível em < <http://www.arduino.cc/> >. Acesso em 09 de fev. 2023.
- AUTODESK TINKERCAD, 2023. Disponível em: <https://www.tinkercad.com>. Acesso em: 02/02/2023. ASHRAE. Environment control for animals and plants. In: **ASHRAE Handbook of Applications**. USA: ASHRAE, 1978. Chapter 22, p. 22.1 - 22.20, 1978.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Bertrand Brasil – Rio de Janeiro. 4 ed. 332 p., 1996
- BACON. E. C. V.; VIEIRA NETO, J. G.; ARCE, L. M.; MIGLIORIN, V. P.; GRISOSTIMO, T. E. Distribuição de temperatura na vertical e na horizontal no interior de uma estufa agrícola. In: **12° Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – SIEPE**. 2020.
- BAÊTA, C. F.; SOUZA, F. C. **Ambiência em edificações rurais**. Conforto animal. 2. Ed. - Viçosa, MG: Ed. UFV, p. 270-170, 2012.
- BELEM, A. R. Z. **Sistema de monitoramento de temperatura e umidade em aviários**. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia da Computação) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 67p., 2011.
- BOJACÁ, C. R.; GIL, R.; GÓMEZ, S.; COOMAN, A.; SCHREVEENS, E. Analysis of greenhouse air temperature distribution using geostatistical methods. **American Society of Agricultural and Biological** – ASABE, v. 52(3), p. 957-968, 2009.
- CARVALHO, N. A.; BEZERRA, H. DE M.; NETTO, A. J.; ROCHA, M. L. Controle de uma Estufa Agrícola Utilizando Controlador Lógico Programável. In: Encontro de estudantes de informática do Tocantins, 11, 2009, Palmas. **Anais...** Palmas, Centro Universitário Luterano de Palmas, 2009. p. 131-140.

CLIMATE-DATA.ORG- CLIMA ALEGRETE (BRASIL). Disponível em: <
<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/alegrete-43771/>
>/Acesso em 29 de jan. 2021.

ELSNER, B., BRIASSOULIS, D., WAAIJENBERG, D., MISTRITIS, A., ZABELTITZ, C., GRATRAUD, J., RUSSO, G. S. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries, part II: typical designs. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 75. p. 112, 2000.

EVANS, Dave. A Internet das Coisas: Como a próxima evolução da Internet está mudando tudo. **CISCO IBSG**, 2011.

FERNANDES, E. T. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de temperatura e umidade em estufas agrícolas**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Maringá, 57 f., 2015.

FERNANDES, E. T.; VIEIRA NETO, J. G.; BOMBARDELLI, W. A.; SOUZA, E. L.; SILVA, R. P. Desenvolvimento e análise de um sistema de monitoramento de umidade relativa e temperatura em estufa agrícola. **Anais...** In: XXIX Coneeagri. UFF – Niterói, 2016.

HELLICKSON, M.A.; WALKER, J.N. **Ventilation of agricultural structures**. St. Joseph: ASAE, 1983. 372 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Disponível em: <
mapas.inmet.gov.br>. Acesso em: 20/05/2023

MAKISHIMA, N.; REIS, N.V.B.; CARRIJO, O. A. Estruturas de proteção. In: MAKISHIMA, N.; CARRIJO, O. A. (ed.). Cultivo protegido do tomateiro. Brasília: EMBRAPA-CNPQ, 1998.

MAMEDE, Fernando Matias et al. Uso do Cálculo Numérico Aplicado em Softwares. **Revista Campo do Saber**, v. 4, n. 3, 2018.

PSICRO v1.4 – DAU-UFFRJ- RC/ 2001

PURQUERIO, L. F. V.; TIVELLI, S. W. Manejo do Ambiente em Cultivo Protegido. In: **Manual técnico de orientação: projeto hortalimento**. São Paulo: Codeagro, 2006.

REIS, N.V.B. Construção de estufas para a produção de hortaliças. CIRCULAR TÉCNICA. **Embrapa Hortaliças**, v. 38, p.1-16, 2005.

ROBOCORE- Kit iniciante arduino v8, 2022. Disponível em: <<https://www.robocore.net/tutoriais/kit-iniciante-v8-medindo-temperatura-e-umidade>>. Acesso em: 02/08/2022.

SAPOUNAS, A. A.; MARTZOPOULOU, C. N.; SPIRIDIS, A. Prediction the spatial air temperature distribution of an experimental greenhouse using geostatistical methods. **Acta Horticulturae**. International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007. 801, p. 495-500, 2008.

SILVA, A. B.; DA SILVA, R. A.; PAGIUCA, G. L. Cultivo Protegido. Hortifruti Brasil: p. 10-16, 2014.

SILVA, E. T.; BYLLARDT, L. V. B.; GOMES, S.; WOLF, G. D. V. Comportamento da temperatura do ar sob condições de cultivo em ambiente protegido. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v.1, n.1, p. 51-54, jan./mar. 2003.

TECNOFERRAMENTAS – Loja especializada em equipamentos e ferramentas para eletrônica, 2022. Disponível em: <<https://www.tecnoferramentas.com.br/>>. Acesso em: 20/05/2022.

VIEIRA NETO, J. G. **Influência da forma de estufas agrícolas na performance estrutural e no conforto térmico**. Dissertação de mestrado (Construções rurais e ambiência), Universidade Estadual de Campinas, 87 p., 2015.

ZANATTA ESTUFAS AGRICOLAS – Manual do fabricante, 2014. Disponível em: <<https://www.zanatta.com.br>>. Acesso em: 20/05/2022.

APÊNDICES

Apêndice A: Programação desenvolvida no projeto.

```

/*****
* Kit Iniciante para Arduino v8 - Utilizando o DHT11
* Mostrar os valores de Tempartura e Umidade no Monitor Serial.
*****/

// Inclui a biblioteca DHT que possui as funções dos sensores do tipo DHT
#include "DHT.h"

const int pino_dht = 9; // pino onde o sensor DHT está conectado
float temperatura; // variável para armazenar o valor de temperatura
float umidade; // variável para armazenar o valor de umidade
DHT dht(pino_dht, DHT22); // define o pino e o tipo de DHT

void setup() {
  // Inicia e configura a Serial
  Serial.begin(9600); // 9600bps

  dht.begin(); // inicializa o sensor DHT
}

void loop() {
  // Aguarda alguns segundos entre uma leitura e outra
  // Serve para definir o intervalo de atualização

  delay(20000); // 30 segundos (Datasheet)

  // A leitura da temperatura ou umidade pode levar 250ms
  // O atraso do sensor pode chegar a 2 segundos
  temperatura = dht.readTemperature(); // lê a temperatura em Celsius
  umidade = dht.readHumidity(); // lê a umidade

  // Se ocorreu alguma falha durante a leitura

```

```
if (isnan(umidade) || isnan(temperatura)) {  
  Serial.println("Falha na leitura do Sensor DHT!");  
}  
else { // Se não  
  // Imprime o valor de temperatura  
  Serial.print("Temperatura: ");  
  Serial.print(temperatura);  
  Serial.print(" *C ");  
  
  Serial.print("\t"); // tabulação  
  
  // Imprime o valor de umidade  
  Serial.print("Umidade: ");  
  Serial.print(umidade);  
  
  Serial.print(" %\t");  
  
  Serial.println(); // nova linha  
}  
}
```


Apêndice C: Dados das coletas de temperatura externa para a realização do cálculo de energia. Verão cortina fechada.

Dados:		33-8		DADOS:	
Dimensões:	15x7x3,5	$Q_{rad} = \tau * I * A_p$		Ap	$Q_{net} = \epsilon_{sup} * \tau_i * \sigma * A_p * (T_i^4 - \epsilon_{ar} * T_c^4)$
Espessura (mm)	0,15	<input type="text" value="80161,578"/>		105	<input type="text" value="-30.502,10 4,31E-06 Ti^4"/>
Angulo (°)	26	$Q_{fot} = Q_{rad} * 3\%$		Ac	
Altitude local (r)	95	<input type="text" value="2404,85"/>		288,36	
Latitude:	22°S	$Q_{resp} = 10\% * Q_{fot}$		Per	$Q_{rad} + Q_{resp} = Q_{cnd} + Q_{pis} + Q_{rtc} + Q_{fot}$
TBS (°C)	29,86	<input type="text" value="240,5"/>		44	<input type="text" value="80402,1 ≈ -667293,9 2109,49 Ti 4,31E-06 Ti^4"/>
TBU (°C)	24,3	$Q_{cnd} = U * A_c * \Delta T$		Aa	<input type="text" value="747696,0"/>
UR max (%)	61,33	<input type="text" value="-623864,4 2058,89 Ti"/>		105	<input type="text" value="Ti = 330,165 K"/>
Tmed min (°C)	28,03	$Q_{pis} = F * P_{er} * \Delta T$			<input type="text" value="57,015 °C"/>
UR min (%)	55,4	<input type="text" value="-15332,306 50,6 Ti"/>			
ETc (mm dia)	0,5				
Vv (m/s)	2,1				
Direção:	SE				
ρ (kg/m ³)	1				
Fc	0,98				
T	0,92				
ϵ	0,85				
Ti	0,85				
I verão (W/m ²)	829,83				
I inverno (W/m ²)	21,01				
Constantes:					
U (W/m ² .K)	7,14				
F (W/m.K)	1,15				
Cp (J/kg.K)	1006				
E	0,35				
ϵ_{sup}	0,85				
Tt	0,85				
σ (W/m ² .K ⁴)	5,68E-08				
ϵ_{ar}	0,84				

Apêndice D: Leituras das variáveis de temperatura e umidade Inverno e Verão.

Inverno (08:00-08:05)	Tratamentos	Dia	Repetição	Temperatura (°C)	Umidade (%)
1º dia	Termo-higrometro 1	09/08/2022	1	14,4	59
	Termo-higrometro 1	09/08/2022	2	14,5	60
	Termo-higrometro 1	09/08/2022	3	14,3	60
	Termo-higrometro 1	09/08/2022	4	14	61
	Termo-higrometro 1	09/08/2022	5	14,1	60
	Termo-higrometro 1	09/08/2022	6	14	60
	Arduíno	09/08/2022	1	12,7	90
	Arduíno	09/08/2022	2	12,6	90
	Arduíno	09/08/2022	3	12,7	90
	Arduíno	09/08/2022	4	14	91
	Arduíno	09/08/2022	5	15,6	86
	Arduíno	09/08/2022	6	14	91
2º dia	Termo-higrometro 1	10/08/2022	1	11,1	49
	Termo-higrometro 1	10/08/2022	2	11	50
	Termo-higrometro 1	10/08/2022	3	10,8	50
	Termo-higrometro 1	10/08/2022	4	10,5	50
	Termo-higrometro 1	10/08/2022	5	10	51
	Termo-higrometro 1	10/08/2022	6	10	52
	Arduíno	10/08/2022	1	8,1	88
	Arduíno	10/08/2022	2	8	88
	Arduíno	10/08/2022	3	8	88
	Arduíno	10/08/2022	4	8,1	88
	Arduíno	10/08/2022	5	8,2	88
	Arduíno	10/08/2022	6	8,2	88
3º dia	Termo-higrometro 1	11/08/2022	1	13,9	45
	Termo-higrometro 1	11/08/2022	2	13,5	46
	Termo-higrometro 1	11/08/2022	3	13	47
	Termo-higrometro 1	11/08/2022	4	12,8	47
	Termo-higrometro 1	11/08/2022	5	12,5	48
	Termo-higrometro 1	11/08/2022	6	11,7	49
	Arduíno	11/08/2022	1	8,7	88
	Arduíno	11/08/2022	2	8,7	88
	Arduíno	11/08/2022	3	8,7	88
	Arduíno	11/08/2022	4	8,8	88
	Arduíno	11/08/2022	5	8,9	88
	Arduíno	11/08/2022	6	9	88
4º dia	Termo-higrometro 1	12/08/2022	1	12,4	61
	Termo-higrometro 1	12/08/2022	2	12,4	61
	Termo-higrometro 1	12/08/2022	3	12,4	61

	Termo-higrometro 1	12/08/2022	4	12,4	61
	Termo-higrometro 1	12/08/2022	5	12,5	61
	Termo-higrometro 1	12/08/2022	6	12,5	61
	Arduíno	12/08/2022	1	10,3	94,4
	Arduíno	12/08/2022	2	10,4	94,2
	Arduíno	12/08/2022	3	10,5	94,1
	Arduíno	12/08/2022	4	12	90,8
	Arduíno	12/08/2022	5	11,6	91,9
	Arduíno	12/08/2022	6	11,4	92
5º dia	Termo-higrometro 1	13/08/2022	1	15	61
	Termo-higrometro 1	13/08/2022	2	14,9	61
	Termo-higrometro 1	13/08/2022	3	14,9	62
	Termo-higrometro 1	13/08/2022	4	14,9	62
	Termo-higrometro 1	13/08/2022	5	14,9	62
	Termo-higrometro 1	13/08/2022	6	14,9	63
	Arduíno	13/08/2022	1	13	90,1
	Arduíno	13/08/2022	2	13,2	89,5
	Arduíno	13/08/2022	3	13,3	89,3
	Arduíno	13/08/2022	4	13,3	89,2
	Arduíno	13/08/2022	5	13,4	89,4
	Arduíno	13/08/2022	6	13,4	89,4
6º dia	Termo-higrometro 1	14/08/2022	1	16,3	64
	Termo-higrometro 1	14/08/2022	2	16,3	65
	Termo-higrometro 1	14/08/2022	3	16,3	65
	Termo-higrometro 1	14/08/2022	4	16,3	65
	Termo-higrometro 1	14/08/2022	5	16,4	66
	Termo-higrometro 1	14/08/2022	6	16,2	66
	Arduíno	14/08/2022	1	15,2	94,20
	Arduíno	14/08/2022	2	15,4	94,10
	Arduíno	14/08/2022	3	15,4	93,80
	Arduíno	14/08/2022	4	15,4	93,70
	Arduíno	14/08/2022	5	15,4	93,60
	Arduíno	14/08/2022	6	15,4	93,50
7º dia	Termo-higrometro 1	15/08/2022	1	17,5	66
	Termo-higrometro 1	15/08/2022	2	17,4	66
	Termo-higrometro 1	15/08/2022	3	17,20	67
	Termo-higrometro 1	15/08/2022	4	17,1	67
	Termo-higrometro 1	15/08/2022	5	17	68
	Termo-higrometro 1	15/08/2022	6	16,9	68
	Arduíno	15/08/2022	1	16,2	94,20
	Arduíno	15/08/2022	2	16,1	94,10
	Arduíno	15/08/2022	3	16,1	94,10
	Arduíno	15/08/2022	4	16,1	94,20
	Arduíno	15/08/2022	5	16,1	94,50
	Arduíno	15/08/2022	6	16,1	94,50

8º dia	Termo-higrometro 1	16/08/2022	1	14,3	59
	Termo-higrometro 1	16/08/2022	2	14,5	59
	Termo-higrometro 1	16/08/2022	3	14,6	60
	Termo-higrometro 1	16/08/2022	4	14,7	60
	Termo-higrometro 1	16/08/2022	5	14,8	60
	Termo-higrometro 1	16/08/2022	6	13,4	60
	Arduíno	16/08/2022	1	11,8	94,70
	Arduíno	16/08/2022	2	12,3	93,80
	Arduíno	16/08/2022	3	12,7	92,80
	Arduíno	16/08/2022	4	13	93,00
	Arduíno	16/08/2022	5	13,2	91,80
	Arduíno	16/08/2022	6	13,4	91,20
9º dia	Termo-higrometro 1	17/08/2022	1	16,3	65
	Termo-higrometro 1	17/08/2022	2	16,4	65
	Termo-higrometro 1	17/08/2022	3	16,6	66
	Termo-higrometro 1	17/08/2022	4	16,7	66
	Termo-higrometro 1	17/08/2022	5	16,9	66
	Termo-higrometro 1	17/08/2022	6	17,1	66
	Arduíno	17/08/2022	1	15,8	91,60
	Arduíno	17/08/2022	2	16	91,60
	Arduíno	17/08/2022	3	16,2	91,30
	Arduíno	17/08/2022	4	16,4	91,20
	Arduíno	17/08/2022	5	16,5	91,20
	Arduíno	17/08/2022	6	16,8	90,50
10º dia	Termo-higrometro 1	18/08/2022	1	9,3	49
	Termo-higrometro 1	18/08/2022	2	9,2	51
	Termo-higrometro 1	18/08/2022	3	9,2	51
	Termo-higrometro 1	18/08/2022	4	9,1	53
	Termo-higrometro 1	18/08/2022	5	9,1	54
	Termo-higrometro 1	18/08/2022	6	9,2	56
	Arduíno	18/08/2022	1	6,8	94,10
	Arduíno	18/08/2022	2	7,1	93,80
	Arduíno	18/08/2022	3	7,2	93,50
	Arduíno	18/08/2022	4	7,4	93,60
	Arduíno	18/08/2022	5	7,5	93,20
	Arduíno	18/08/2022	6	7,8	93,10

Verão (15:00-15:05)	Tratamentos	Dia	Repetição	Temperatura (°C)	Umidade (%)
1º dia	Termo-higrometro 1	04/01/2023	1	52,9	10
	Termo-higrometro 1	04/01/2023	2	53,5	10
	Termo-higrometro 1	04/01/2023	3	53,5	10
	Termo-higrometro 1	04/01/2023	4	53,9	10
	Termo-higrometro 1	04/01/2023	5	54	10
	Termo-higrometro 1	04/01/2023	6	52,5	10
	Arduíno	04/01/2023	1	46,3	31,4

	Arduíno	04/01/2023	2	48,7	29,8
	Arduíno	04/01/2023	3	49,6	28,4
	Arduíno	04/01/2023	4	49,9	27,7
	Arduíno	04/01/2023	5	48,5	27,5
	Arduíno	04/01/2023	6	47,7	28
2ºdia	Termo-higrometro 1	05/01/2023	1	43,8	25,2
	Termo-higrometro 1	05/01/2023	2	46,1	25
	Termo-higrometro 1	05/01/2023	3	47,7	23
	Termo-higrometro 1	05/01/2023	4	48,9	22
	Termo-higrometro 1	05/01/2023	5	49,2	22
	Termo-higrometro 1	05/01/2023	6	50,2	22
	Arduíno	05/01/2023	1	35,8	36
	Arduíno	05/01/2023	2	38,7	40
	Arduíno	05/01/2023	3	44,2	35,9
	Arduíno	05/01/2023	4	47,6	31,1
	Arduíno	05/01/2023	5	49,6	29,8
	Arduíno	05/01/2023	6	50,1	29,7
3ºdia	Termo-higrometro 1	06/01/2023	1	34	38
	Termo-higrometro 1	06/01/2023	2	37,4	39
	Termo-higrometro 1	06/01/2023	3	37,9	36
	Termo-higrometro 1	06/01/2023	4	39,9	36
	Termo-higrometro 1	06/01/2023	5	43,5	31
	Termo-higrometro 1	06/01/2023	6	45,1	30
	Arduíno	06/01/2023	1	46,9	32
	Arduíno	06/01/2023	2	48,4	31,2
	Arduíno	06/01/2023	3	51,2	28,7
	Arduíno	06/01/2023	4	52,9	27
	Arduíno	06/01/2023	5	54	26,7
	Arduíno	06/01/2023	6	54,5	26,6
4ºdia	Termo-higrometro 1	07/01/2023	1	42,4	31
	Termo-higrometro 1	07/01/2023	2	44,1	28
	Termo-higrometro 1	07/01/2023	3	45,8	27
	Termo-higrometro 1	07/01/2023	4	46,7	26
	Termo-higrometro 1	07/01/2023	5	47	25
	Termo-higrometro 1	07/01/2023	6	48,5	22
	Arduíno	07/01/2023	1	38,6	36,7
	Arduíno	07/01/2023	2	40,6	34,5
	Arduíno	07/01/2023	3	42,2	33,1
	Arduíno	07/01/2023	4	44,8	30,3
	Arduíno	07/01/2023	5	46,6	29
	Arduíno	07/01/2023	6	49	28,6
5ºdia	Termo-higrometro 1	08/01/2023	1	42,9	30
	Termo-higrometro 1	08/01/2023	2	43,8	30
	Termo-higrometro 1	08/01/2023	3	44,4	30
	Termo-higrometro 1	08/01/2023	4	45,2	30

	Termo-higrometro 1	08/01/2023	5	46,2	29
	Termo-higrometro 1	08/01/2023	6	48,2	26
	Arduíno	08/01/2023	1	49,6	29,4
	Arduíno	08/01/2023	2	50,5	28,7
	Arduíno	08/01/2023	3	51,1	28,4
	Arduíno	08/01/2023	4	52,4	28,7
	Arduíno	08/01/2023	5	52,7	27,9
	Arduíno	08/01/2023	6	53	27,5
6ºdia	Termo-higrometro 1	09/01/2023	1	39,4	45
	Termo-higrometro 1	09/01/2023	2	42,4	38
	Termo-higrometro 1	09/01/2023	3	43,8	36
	Termo-higrometro 1	09/01/2023	4	44,7	35
	Termo-higrometro 1	09/01/2023	5	46,7	34
	Termo-higrometro 1	09/01/2023	6	47,1	33
	Arduíno	09/01/2023	1	45,3	37,6
	Arduíno	09/01/2023	2	49,4	32,4
	Arduíno	09/01/2023	3	51,4	29,5
	Arduíno	09/01/2023	4	52,9	28,8
	Arduíno	09/01/2023	5	54	28,6
	Arduíno	09/01/2023	6	54,4	28,6
7ºdia	Termo-higrometro 1	10/01/2023	1	36,5	37
	Termo-higrometro 1	10/01/2023	2	37,8	35
	Termo-higrometro 1	10/01/2023	3	38,4	35
	Termo-higrometro 1	10/01/2023	4	38,9	35
	Termo-higrometro 1	10/01/2023	5	39,1	34
	Termo-higrometro 1	10/01/2023	6	39,8	33
	Arduíno	10/01/2023	1	36,9	43,8
	Arduíno	10/01/2023	2	37,8	42,8
	Arduíno	10/01/2023	3	39,1	40,5
	Arduíno	10/01/2023	4	40,1	39,1
	Arduíno	10/01/2023	5	40,4	37,9
	Arduíno	10/01/2023	6	40,6	38,2
8ºdia	Termo-higrometro 1	11/01/2023	1	35,8	46
	Termo-higrometro 1	11/01/2023	2	36,6	47
	Termo-higrometro 1	11/01/2023	3	37,1	46
	Termo-higrometro 1	11/01/2023	4	38,2	43
	Termo-higrometro 1	11/01/2023	5	39,8	40
	Termo-higrometro 1	11/01/2023	6	40,5	39
	Arduíno	11/01/2023	1	40,8	42,2
	Arduíno	11/01/2023	2	46,1	36,4
	Arduíno	11/01/2023	3	48	34,7
	Arduíno	11/01/2023	4	48,9	33,2
	Arduíno	11/01/2023	5	49,2	33,5
	Arduíno	11/01/2023	6	49,3	32,8
9ºdia	Termo-higrometro 1	12/01/2023	1	31,8	50

	Termo-higrometro 1	12/01/2023	2	33,5	50
	Termo-higrometro 1	12/01/2023	3	35,8	49
	Termo-higrometro 1	12/01/2023	4	37,8	46
	Termo-higrometro 1	12/01/2023	5	39,5	45
	Termo-higrometro 1	12/01/2023	6	41,1	44
	Arduíno	12/01/2023	1	35,5	56
	Arduíno	12/01/2023	2	42	43,2
	Arduíno	12/01/2023	3	44,2	40,2
	Arduíno	12/01/2023	4	45,6	38,4
	Arduíno	12/01/2023	5	46,5	36,4
	Arduíno	12/01/2023	6	47,4	35,8
10°dia	Termo-higrometro 1	13/01/2023	1	27,7	69
	Termo-higrometro 1	13/01/2023	2	28,8	64
	Termo-higrometro 1	13/01/2023	3	29	63
	Termo-higrometro 1	13/01/2023	4	29,8	62
	Termo-higrometro 1	13/01/2023	5	30,6	61
	Termo-higrometro 1	13/01/2023	6	31,6	59
	Arduíno	13/01/2023	1	29,9	75,8
	Arduíno	13/01/2023	2	30,5	74,6
	Arduíno	13/01/2023	3	30,4	72,9
	Arduíno	13/01/2023	4	30,6	71,6
	Arduíno	13/01/2023	5	31,4	72,6
	Arduíno	13/01/2023	6	28,9	74,7