

ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROLE PARA CONSTRUÇÃO DE UMA CHOCADORA DE BAIXO CUSTO AUTOMATIZADA

COMPARATIVE STUDY OF CONTROL TECHNIQUES FOR A LOW-COST AUTOMATIC BROODER DEVELOPMENT

Lucas Figueiredo Vinente¹ 

Gilson Fernandes Braga Junior² 

Resumo: O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um controlador de temperatura para uma chocadeira feita em madeira marupá. O objetivo do projeto é construir a chocadeira com controle de temperatura por meio de sintonia de controladores. Utilizou-se o software MATLAB® e a ferramenta simulink® para simular e implementar as sintonias de controle PI, conectando-os ao Arduino por meio da biblioteca Arduino IO, e para representação das ligações dos componentes utilizou-se o software fritzing. A partir da resposta à entrada degrau em malha aberta, obteve-se a função de transferência que representa o sistema térmico. Em seguida, simulações foram realizadas das sintonias mais utilizadas para a escolha da mais adequada ao controle do sistema proposto. As sintonias Ziegler-Nichols (ZN) e Integral do Tempo Multiplicado pelo Valor Absoluto do Erro (ITAE) apresentaram resultados promissores nas simulações, porém, experimentalmente, não foram adequadas. Dessa forma, optou-se pelo tradicional controle on-off, que obteve o melhor desempenho. O custo para fabricação foi de R\$342,77 reais. Devido às limitações encontradas nas sintonias avaliadas, o controle on-off foi adotado como solução para este sistema.

Palavras-chave: Protótipo, Chocadeira, Controle PI, Sintonia, Controle on-off.

Abstract: The present work proposes the development of a temperature controller for a marupá wood brooder. The objective of the project is to build the incubator with temperature control by tuning controllers. The MATLAB® software and the simulink® tool were used to simulate and implement the PI control tunings, connecting them to the Arduino through the Arduino IO library. From the open-loop step response, the first-order transfer function representing the thermal system was obtained. Next, simulations were carried out with common used tuning methods in order to choose the most suitable one for the proposed temperature control. The Ziegler-Nichols (ZN) and In-tegral Time Multiplied by the Absolute Error Value (ITAE) tuning showed promising results in the simulations, however, experimentally, they were not adequate. Thus, the traditional on-off control was chosen, which obtained the best performance. The fabrication cost was R\$342,77 reais. However, due to the limitations found in the evaluated tunings, the on-off control was adopted as a solution for this system.

Keywords: Prototype, Brooder, PI Control, Tuning, on-off Control.

¹ Bacharel em Engenharia Física, Ufopa, lucaspachica1999@gmail.com

¹ Professor do programa de ciência e tecnologia, Ufopa, gilson.braga@ufopa.edu.br

1 INTRODUÇÃO

A avicultura é a atividade de criação de aves com a finalidade de produzir alimentos, como a carne e ovos. As espécies mais utilizadas nesta prática são codornas, patos, marrecos, perus, avestruzes, entre outros, porém em menor escala quando comparado aos frangos (LOPEZ, 2011).

No Brasil, a produção de frango desempenha papel de destaque na economia. Em 2017, o País figurou como o segundo maior produtor de frango do mundo, com aproximadamente 13,06 milhões de toneladas produzidas ao ano. Quando levadas em conta as exportações, ele torna-se o maior exportador com 4,3 milhões de toneladas ao ano, posto que vem ocupando por um longo período (CAVALCANTI, 2019).

A produção de aves em larga escala tem se beneficiado de melhorias implementadas nas condições de criação, investimentos em remédios para as aves e na automação do processo de chocagem dos ovos. A automação do processo de chocagem tornou-se essencial para garantir maior taxa de eclosão, maior eficiência produtiva e melhor controle do ambiente interno das chocadeiras. No entanto, esse dinamismo presente na produção em larga escala não é verificado por pequenos produtores, devido principalmente ao elevado custo das chocadeiras comerciais.

As técnicas de controle mais utilizadas na indústria de chocadeiras são basicamente os controladores ON-OFF, e os controladores Proporcional e Integral (PI) ou proporcional, integral e derivativo (PID), que podem também ser encontrados em diversos sistemas do tipo (SAGRILLO et al., 2023). Neste sentido, o presente trabalho apresenta o estudo teórico-experimental de um sistema térmico que visa o controle de temperatura dentro de uma chocadeira construída a partir da madeira marupá, utilizando essas técnicas. Através de uma revisão da literatura, buscou-se entender quais parâmetros são essenciais para o sucesso de uma chocadeira e, com base nos materiais disponíveis, propuseram-se o controle de temperatura através de sintonia de controladores e controle ON-OFF.

Desta forma, o objetivo do presente trabalho consiste na construção de um protótipo de chocadeira feito em madeira com monitoramento e controle de

temperatura, rolagem de ovos e fluxo de ar utilizando a plataforma de prototipagem Arduino.

2 REVISÃO DE LITERATURA

As chocadeiras automatizadas diferem das usuais (àquelas em que o próprio produtor efetua a viragem dos ovos, por exemplo) por fazer o controle de temperatura, umidade relativa do ar (UR), ventilação e viragem dos ovos de forma totalmente autônoma (AMORIM, 2021).

Devido ao custo elevado de aquisição uma parcela significativa dos pequenos produtores encontra dificuldades em obter uma chocadeira comercial (PERLIN et al., 2019). Neste sentido há vários trabalhos cujo objetivo é desenvolver um protótipo de chocadeira de baixo custo que se torne acessível a essa parcela de produtores utilizando Arduino.

Perlin et al. (2019) construíram uma chocadeira automatizada de baixo custo com acompanhamento remoto por meio de Internet das coisas (do inglês, Internet of Things - IoT). O processo de automação obedeceu a um sistema construído com três módulos: de monitoramento, o controle e a visualização, que foram regidos pela plataforma Arduino. A partir de dois experimentos, os autores tiveram como resultado uma taxa de eclosão de 81,25% no primeiro e 77,77% no segundo, onde a taxa de mortalidade após a eclosão foi de 100% e 44,44% para o primeiro e segundo experimento, respectivamente. Os autores apontaram como fatores inibidores de sucesso a influência da temperatura externa e a localização dos ovos em relação a lâmpada.

Neste âmbito, Amorim (2021) utilizou uma caixa de isopor como chocadeira. Foram utilizados cooler, um Arduino como controlador, protoboard, resistência térmica de chuveiro para aquecimento, display LCD, bandeja para água, e dois sensores de temperatura e apenas um sensor de umidade. O controle da temperatura foi do tipo liga-desliga e o de umidade ocorreu de forma manual. O autor verificou que o protótipo desenvolvido apresentou menor custo quando comparado às chocadeiras comerciais, porém possui menor capacidade de ovos devido ao baixo torque do motor utilizado para a rolagem. A taxa de eclosão dos ovos foi de 80%, sendo a localização dos ovos em relação a resistência o fator de perda de acordo com o autor.

Seguindo essa linha, Nogueira et al. (2019) construiu uma chocadeira em madeira compensada e a automação foi executada utilizando a plataforma Arduino, o qual atuou no controle de temperatura e umidade através de aplicação web. Os autores não apresentaram dados referentes a taxas de eclosão e mortalidade após eclosão. O controle de temperatura ON-OFF mostrou-se promissor e o custo ficou menor que aquele encontrado no mercado.

Em Almeida (2018) é apresentado um estudo dos efeitos adversos que podem ocorrer no processo de incubação natural, como solução alternativa o autor construiu uma chocadeira automática a partir de uma comercial utilizando Arduino com comunicação GSM (do inglês, Global System for Mobile Communications). Implementou controle de temperatura e umidade (este último é um grande diferencial do trabalho), sensor sonoro para identificar o nascimento dos pintos, e sistema de alimentação de água para manter a umidade dentro dos valores pré-estabelecidos. De acordo com seus resultados, houve um aumento da porcentagem de eclosão dos ovos, o que aponta a capacidade do seu modelo em melhorar a taxa de eclosão. O aumento verificado está relacionado a dois fatores, o sistema autônomo de alimentação de água e a interrupção da rolagem dos ovos após o nascimento.

Semelhante ao que fez Perlin et al. (2019), Zófoli (2022) elaborou um protótipo de chocadeira de baixo custo com comunicação via servidor visando o acompanhamento em tempo real dos ovos dentro da chocadeira a partir de uma existente no mercado. Foi implementado um aplicativo Android onde o produtor pudesse fazer o acompanhamento via celular. Porém, conforme informa o autor, os testes não ocorreram durante todo o período de chocagem dos ovos, mas todo o arranjo de controle com programação Arduino manteve resultados satisfatórios para a temperatura e umidade, bem como para o acompanhamento remoto via internet.

De acordo com os trabalhos apresentados, o controle de temperatura é um fator desafiador em protótipos de chocadeira, uma vez que pequenas variações nesse parâmetro podem ter impactos significativos no desenvolvimento do embrião ao longo dos 21 dias de incubação. Para que a choca ocorra de forma satisfatória a temperatura interna da chocadeira deve estar entre 37,4 e 37,8 °C (NOGUEIRA et al., 2019; AMORIM, 2021). Outro

parâmetro crucial é a umidade, que deve obedecer a valores específicos em diferentes períodos. Nos primeiros 19 dias é fundamental que a umidade se mantenha entre 50 e 55%, e nos últimos 3 dias, deve aumentar gradualmente até 60%, conforme aponta Amorim (2021). Não menos importante, a rolagem dos ovos para sistemas com ventiladores é indicada a cada 2 horas (VIOLA et al., 2019).

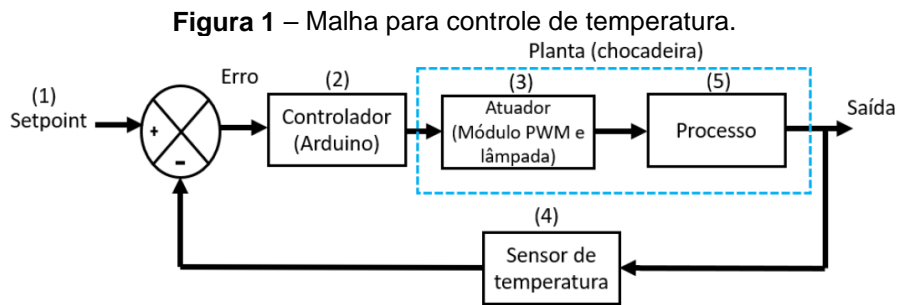
De acordo com o exposto, dentre os parâmetros controladas, para obter uma proximidade com a choca natural e ter sucesso no fim do processo, destacam-se a temperatura, umidade, ventilação e rolagem dos ovos (AMORIM, 2021).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do dispositivo, seguiu-se o fluxo de um projeto de protótipo em engenharia, partindo-se de um desenho conceitual da estrutura física e do mecanismo de rolagem de ovos, para o posterior construção e seleção de materiais como os elementos sensores e atuadores, que serão incluídos para identificação do sistema (em relação à temperatura em função do aquecimento do elemento atuador), e por fim a sintonia ou projeto de controladores para aplicação e testes de funcionamento, em que devem ser comparados diferentes soluções em termos de características de resposta do sistema para seleção.

3.1 Construção do protótipo

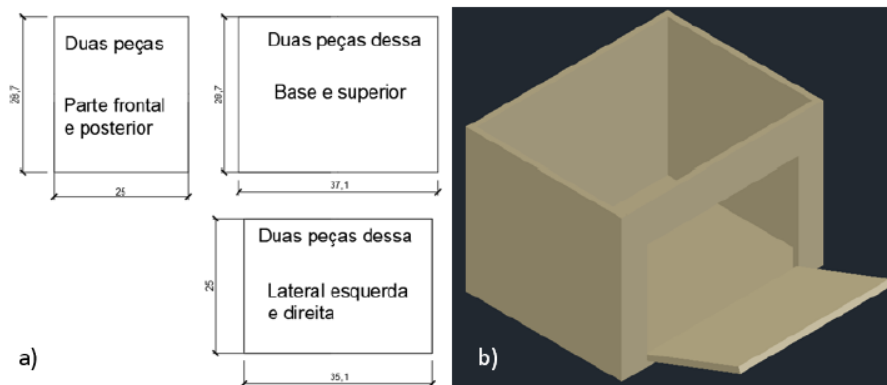
Na Figura 1, é apresentada a malha de controle de temperatura. Em (1) está o SP (*Setpoint*), que é o valor de referência de temperatura, neste caso, deve estar entre 37,4 e 37,8 °C. Há um bloco somador que compara os dados provenientes do sensor de temperatura (4) e fornece o erro. Em (2), o controlador é o Arduino, que atua na planta ou sistema térmico da chocadeira por meio do atuador (3), consistindo no módulo relé de estado sólido e a lâmpada de aquecimento, resultando no processo de aquecimento ou resfriamento (5).



Fonte: Dos autores.

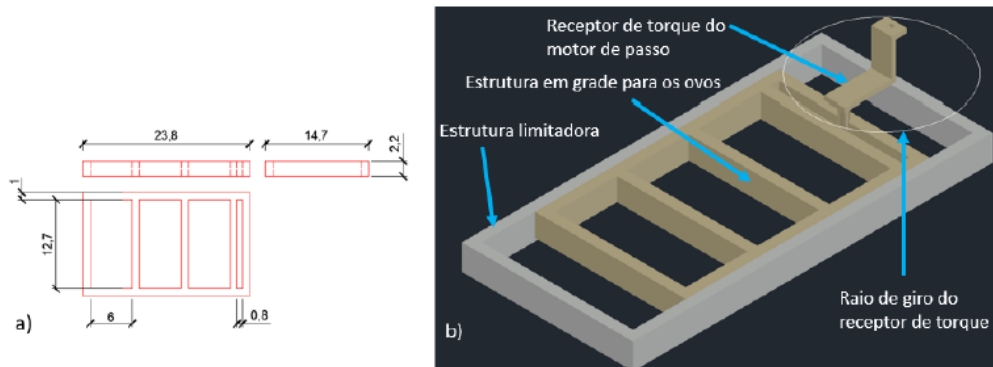
Para a construção do protótipo utilizou-se a madeira Marupá (de nome científico, *Simarouba amara*) que apresenta baixo peso, facilidade para efetuar cortes e fixar pregos, é resistente a ataque de insetos, bem como preço acessível de obtenção na região do Oeste do Pará. A figura 2 a) apresenta o desenho feito no software AutoCAD® 2022/23 versão estudante do caixote montado para comportar os ovos, cujas dimensões são 37,1 cm de comprimento, 28,7 cm de largura e 25 cm de altura com espessura de 1 cm cada, e em b) o desenho 3d. Na figura 3 a) e b) vislumbra-se a estrutura projetada para rolagem dos ovos com seus respectivos desenhos 2d (dimensões em centímetros) e 3d, respectivamente. O receptor de torque é o responsável por transferir o movimento circular do eixo do motor de passo para a estrutura em grade a qual os ovos ficam dispostos. Esta foi envolta por um retângulo externo para limitar o percurso, uma vez que deixada livremente faria o caminho circular, o que prejudicaria a rolagem eficiente dos ovos.

Figura 2 – a) Desenho com dimensões das peças para corte na madeira b) Desenho 3D da estrutura.



Fonte: Dos autores.

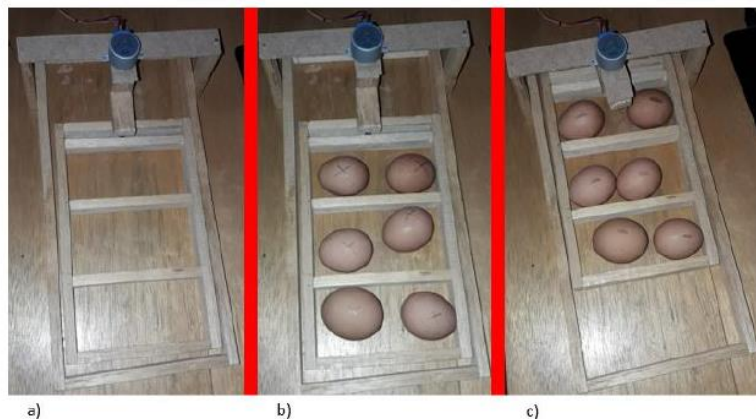
Figura 3 – Estrutura de rolagem dos ovos, em a) vistas com medidas e b) desenho 3D.



Fonte: Dos autores.

Na figura 4 a) é mostrada a estrutura responsável pela viragem dos ovos pronta com exceção da trave que serve de suporte para o motor de passo, construída em outra madeira de menor espessura. Em 4 b) e c) é apresentado o teste com ovos comerciais (não fecundados) para verificar se a rolagem dos ovos seria satisfatória.

Figura 4 – a) Protótipo da estrutura de rolagem dos ovos, em b) e c) mostrando a variação de posição.



Fonte: Dos autores.

Por fim, a estrutura final é apresentada na figura 5. Em a) vê-se a estrutura externa com a porta aberta, possibilitando a visualização de dois compartimentos: um contém a estrutura de rolagem suspensa em uma placa com inúmeros furos, e outro onde o recipiente com água é depositado. Em b), é destacado a parte interna superior, onde estão localizados a lâmpada responsável pelo aquecimento, o cooler para recirculação de ar (ligação direta) e o motor de passo que efetua a rolagem dos ovos.

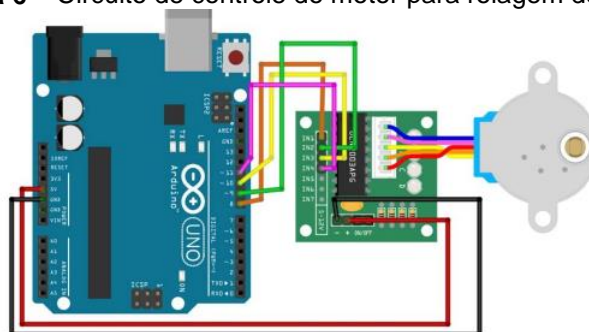
Figura 5 – a) Estrutura externa da chocadeira b) Estrutura interna.



Fonte: Dos autores.

O motor escolhido para fazer a movimentação da estrutura e posterior rolagem dos ovos foi o motor de passo modelo 28BYJ-48 em conjunto com o módulo driver UNL2003, conforme visto na Figura 6. O arranjo composto por estes dois dispositivos é considerado simples e facilita a montagem do circuito (ELETROGATE, 2018). As principais características do motor de passo podem ser visualizadas na Tabela 1.

Figura 6 – Circuito de controle do motor para rolagem de ovos.



Fonte: Dos autores.

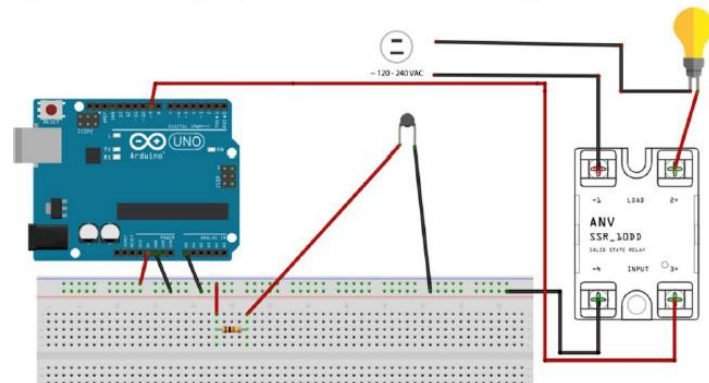
Tabela 1 – Características do motor de passo 28BYJ-48.

Parâmetro	Valor
Tensão	5V
Número de fases	4
Ângulo de passo	5.625°/64
Relação de redução	1/64
Torque de tração	34.3mN.m
Torque de fricção	600-1200 gf.cm

Fonte: Kiatronics (2022).

Para o controle de temperatura, foi utilizado um módulo relé de estado sólido para acionar uma lâmpada de 60W, e para medição de temperatura um sensor do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*). O circuito pode ser visualizado na Figura 7, e as características do sensor são apresentadas na Tabela 2. Os termistores apresentam características não lineares em termos da relação entre a resistência e a temperatura que se deseja medir. É importante citar que a umidade, outro parâmetro importante para este tipo de dispositivos, não foi controlada por limitações em termos de equipamento disponível para o projeto.

Figura 7 – Circuito com sensor de temperatura NTC, relé de estado sólido e lâmpada 60W.



Fonte: Dos autores.

Tabela 2 – Características sensor NTC utilizado

Parâmetro	Valor
Resistência na temperatura de 25 °C	10KΩ ±1%
Valor-B	3380 ±1%
Fator de dissipação	≥2 mW/°C
Constante de tempo para resfriamento	≤ 7 segundos (no ar)
Faixa de medição de temperatura	-55 °C a 125°C

Fonte: Thermistor (2024).

Foi adicionado também um cooler (ventoinha) de computador para forçar a movimentação da massa de ar no interior da chocadeira, para auxiliar na transferência de calor da lâmpada para o ambiente interno por convecção. São listados os custos dos componentes do sistema na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Valores dos componentes utilizados na construção da chocadeira.

Componente	Valor (R\$)
Chapas de Marupá	60,00
Dobradiças de porta com parafusos	29,00
Motor de passo e módulo de controle	17,90
Relé de estado sólido	35,52
Soquete de lâmpada até 100W	9,90
Sensor NTC	0,68
Arduino Uno	66,40
Lâmpada	8,00
Ventoinha (cooler)	35,00
Fios diversos (jumpers)	6,80
Papel alumínio	3,57
Consumíveis (Fita isolante, condutores, tomada, cola, parafusos)	15,00
Fretes diversos	55,00
VALOR TOTAL	342,77

Fonte: Dos autores

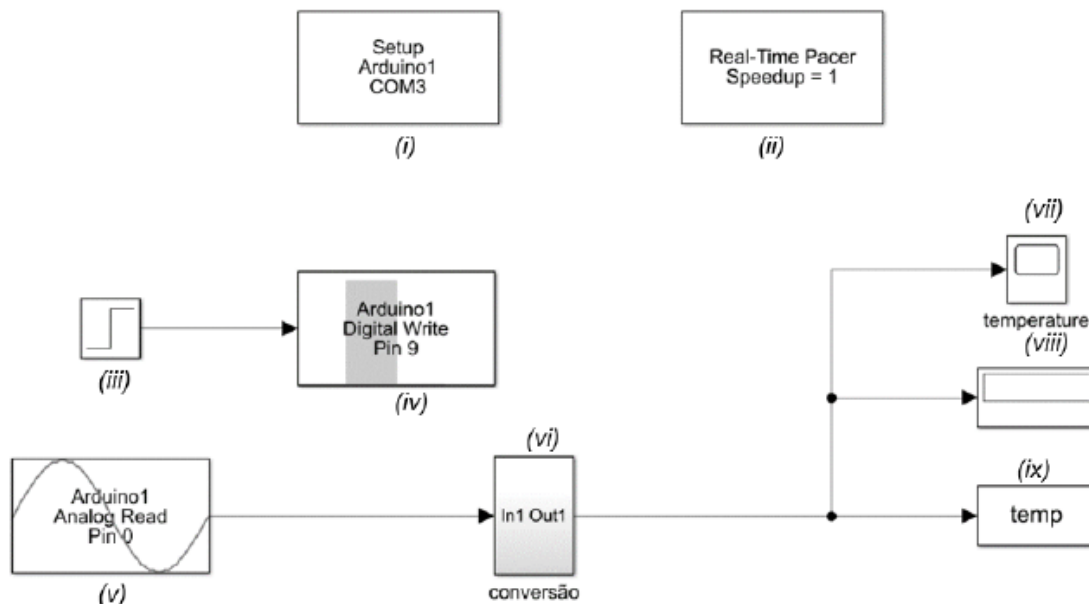
3.2 Etapa de identificação da planta

Com a conclusão da estrutura da chocadeira, deu-se início à fase de testes para projeto do controlador. Nessa etapa, a atenção voltou-se para a parte interna da chocadeira, que consiste no sistema térmico ou planta a ser modelada.

Optou-se por utilizar o Simulink®/Matlab para coletar dados de temperatura proveniente do sensor NTC e para controle, pois o MATLAB possui uma biblioteca que permite a integração com o Arduino (ArduinoIO), tornando o procedimento mais simples ao utilizar diagramas de blocos para a programação.

Durante os testes, o cooler permaneceu ligado de forma contínua. Com a biblioteca ArduinoIO implementada no software MATLAB/Simulink®, obteve-se a resposta ao degrau do sistema a fim de se obter a curva de resposta do sistema e identificação de um modelo de sua dinâmica, a partir do diagrama de blocos da Figura 8. A variável de controle é o ciclo de trabalho do sinal de modulação por largura de pulso (PWM) da plataforma Arduino (controlada via Simulink), que foi considerada como unitária para o valor de 100% do ciclo de trabalho ou valor igual a 1, sinal que é enviado ao relé de estado sólido, o qual aciona a lâmpada responsável pelo aquecimento no interior da chocadeira. Desta forma, foi variado o sinal de controle de desligado (ciclo de trabalho igual a 0%) para o valor de 100% do ciclo de trabalho, de modo a obter o maior valor de temperatura atingido no interior da chocadeira. A variável de saída é a temperatura medida com o auxílio do sensor NTC.

Figura 8 – Diagrama de blocos no ambiente Simulink®.

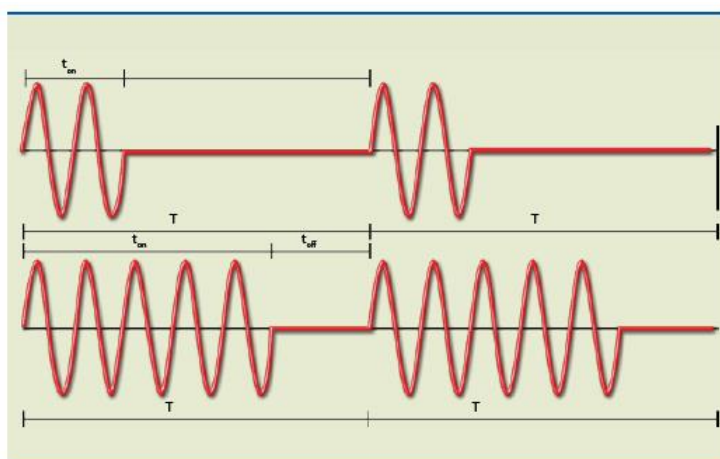


Fonte: Dos autores.

Este diagrama de blocos permite a configuração da porta de conexão serial, que estabelece a ligação entre o Arduino e o computador. No bloco Setup (ii) é definida a velocidade de transmissão das informações coletadas nas portas do Arduino para o computador. Além disso, os blocos (iii) e (iv) desempenham funções específicas no sistema. O bloco (iii) representa a entrada degrau com o valor máximo de 255 (a função analógica que envia os dados recebe 8 bits de informação, fazendo um mapeamento entre 0, mínimo, e 255, o máximo, no sistema decimal, sendo mapeado entre 0 e 100% do ciclo de trabalho), indicando que a lâmpada deve acender totalmente após 30 segundos, para este caso.

O relé de estado sólido utilizado possui um dispositivo TRIAC para controlar a potência entregue a carga, e quando o sinal de PWM possui frequência bem menor que a frequência da rede (a lâmpada utilizada é de corrente alternada), pode-se fornecer mais ou menos potência à carga, conforme ilustrado na Figura 9, para o sinal superior (ciclo de trabalho menor, menor potência entregue à carga) e inferior (ciclo de trabalho maior, maior potência entregue à carga).

Figura 9 – Comparação de dois sinais com ciclos de trabalho diferentes, para ilustração do funcionamento do controle via PWM adotado.



Fonte: Pinto e Albuquerque (2011).

Os blocos (v) e (vi) da Figura 8 têm a finalidade de coletar dados na porta analógica 0, que recebe informações do sensor NTC. Nesse caso, é necessário realizar a conversão desses dados, que é feita no bloco (vi), pois este sensor envia informações na forma de tensão, não diretamente em temperatura. Assim

a temperatura é obtida através das equações (1) e (2) conforme apresentam (SANTOS e SILVA, 2021):

$$V = \frac{5ADC}{1023} \quad (1)$$

Onde os termos V e ADC referem-se a diferença de potencial calculada e o valor obtido pela entrada analógica do Arduino, respectivamente. Logo a resistência do NTC é calculada através da equação (2):

$$R = \frac{V}{(5 - V)} (10000) \quad (2)$$

O sensor NTC está conectado em série com um resistor de 10KΩ, e como o mesmo também é um sensor de resistência máxima de 10KΩ, a tensão máxima que pode ser medida para o cálculo da resistência é de 2,5V, a partir do princípio do divisor de tensão.

Essas equações são então implementadas em um bloco de conversão, sendo o valor temperatura obtido pela equação de SteinHart-Hart, conforme descrito pela Equação 3:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3 \quad (3)$$

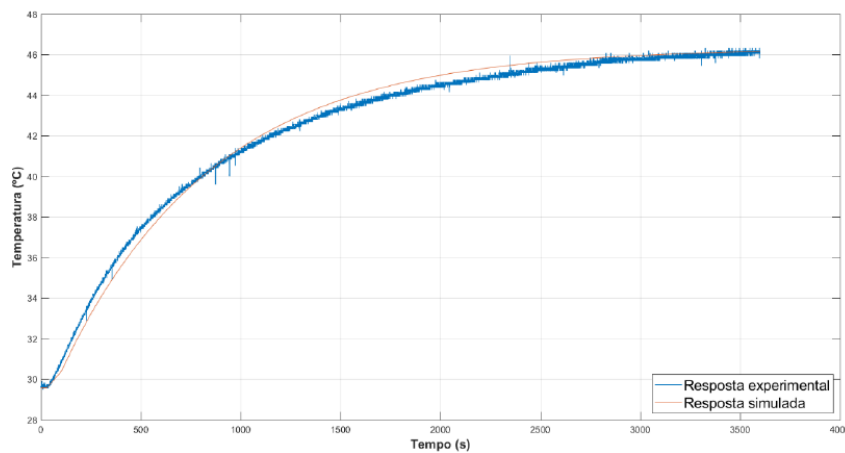
Em que A, B e C os coeficientes a serem determinados. T a temperatura em Kelvin e R a resistência do sensor NTC em sua temperatura correspondente. Foram utilizados os parâmetros obtidos pela calibração em (SANTOS e BRAGA JUNIOR, 2021).

No diagrama de blocos, os blocos (vii), (viii) e (ix) exibem os valores em tempo real da temperatura e da entrada degrau, além da variável “temp” que armazenará os valores de temperatura no sistema.

Ao executar o programa junto ao Arduino chega-se aos resultados da figura 10, onde é apresentado a comportamento da temperatura experimental em função do tempo após 1 hora, linha azul. A curva em vermelho representa a resposta ao degrau da função de transferência obtida para o modelo simulado no Simulink® a partir da curva experimental em azul, dada pela equação (3).

$$G(s) = \frac{16,74e^{-35s}}{(765s + 1)} \quad (3)$$

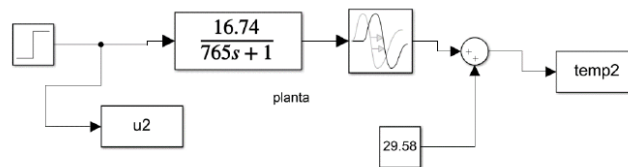
Figura 10 – Resposta ao degrau unitário em malha aberta, lâmpada de 60W.



Fonte: Dos autores.

Observa-se que a temperatura máxima alcançada é da ordem de 46 °C após uma hora. A partir dessa curva obteve-se os valores para uma função de transferência que representa a dinâmica do sistema. Na figura 11, é apresentado o diagrama para simulação e obtenção da curva teórica do sistema em malha aberta. Nesse caso, o modelo é excitado com uma entrada degrau, seguindo uma abordagem similar ao caso experimental. Os resultados obtidos são plotados, e o bloco de valor constante 29,58 representa a contribuição da temperatura ambiente do laboratório, no momento do teste.

Figura 11 – Diagrama de blocos em malha aberta. O Bloco na saída da planta caracteriza o tempo morto (ou atraso de transporte) do sistema.



Fonte: Dos autores.

De posse do modelo em malha aberta obtido, foi realizada a sintonia de controladores do tipo proporcional e integral (PI). A técnica de sintonia de controladores consiste no ajuste dos ganhos de um sistema em malha fechada com retroação baseados em métodos de otimização heurísticos. Esse processo

de ajuste de parâmetros requer definição prévia do critério de desempenho desejado e, principalmente, a garantia da estabilidade da malha de controle. Para isso, é necessário que todos os polos da função da transferência em malha fechada possuam parte real negativa (CAMPOS, 2006). Os métodos de sintonia são utilizados para assegurar essa condição (LAGE, 2019). Pode ser visto na Tabela 4 as fórmulas para cálculo dos ganhos para diferentes métodos de sintonia de controladores do tipo PI. Optou-se por controladores do tipo PI por conta de a dinâmica do sistema ser modelada por uma função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte (ou tempo morto).

Tabela 4 – Cálculo dos parâmetros dos métodos de sintonia de controladores PI avaliados.

Método	Kp	Ki
ZN (Ziegler-Nichols)	$\frac{1,2\tau}{K\theta}$	2θ
CHR (Chien-Hrones-Reswick)	$\frac{0,6\tau}{K\theta}$	θ
CC (Cohen-Coon)	$\left(1,35 + 0,25\frac{\theta}{\tau}\right)\frac{\tau}{K\theta}$	$\frac{(1,35 + 0,25\frac{\theta}{\tau})}{(0,54 + 0,33\frac{\theta}{\tau})}\theta$
Integral do erro (ITAE/IAE)	$\frac{1}{K}\left(A^*\left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{B^*}\right)$	$\frac{\tau}{\left(C^* + D^*\left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}$
Chidambaram	$\frac{1}{K}\left(\left(\frac{\tau}{\theta}\right) + 0,5\right)$	$\tau + 0,5\theta$
IMC (Modelo Interno)	$\frac{2\tau + \theta}{3K\theta}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$

Fonte: Adaptado de Magalhães et. al. (2019).

Em que os valores das constantes A^* , B^* , C^* , D^* são tabelados, sendo apresentados na Tabela 5 para as sintonias ITAE/IAE, respectivamente, os quais foram obtidos a partir de Magalhães et al. (2019).

Tabela 5 – Valores das constantes dos métodos de sintonia ITAE e IAE.

Método	A^*	B^*	C^*	D^*
ITAE	0,965	-0,85	0,796	-0,147
IAE	1,086	-0,869	0,740	-0,130

Fonte: Adaptado de Magalhães et. al. (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da função de transferência do sistema obtida no capítulo anterior, equação (3), foram calculados os ganhos de cada sintonia conforme apresentados na Tabela 6. Com base nesses ganhos, foram realizadas simulações para estimar o comportamento real do sistema da chocadeira em relação a um SP de 37 °C, valor próximo à faixa adequada de temperatura de 37,4 a 37,8 °C.

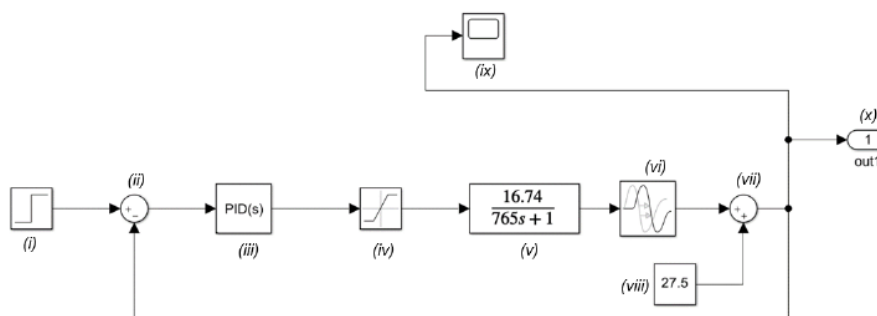
Tabela 6 – Valores dos ganhos calculados para cada método de sintonia.

Método	Kp	Ki
ZN (Ziegler-Nichols)	1,5706	70
CHR (Chien-Hrones-Reswick)	0,7853	765
CC (Cohen-Coon)	0,7952/0,9489	85,8413
Integral do erro (ITAE/IAE)	1,3388	968,9075/1040
Chidambaram	0,8925	782.50
IMC (Modelo Interno)		782,50

Fonte: Dos Autores.

Na figura 12 está representado o diagrama de blocos utilizado para cada método.

Figura 12 – Diagrama de blocos da simulação do sistema térmico

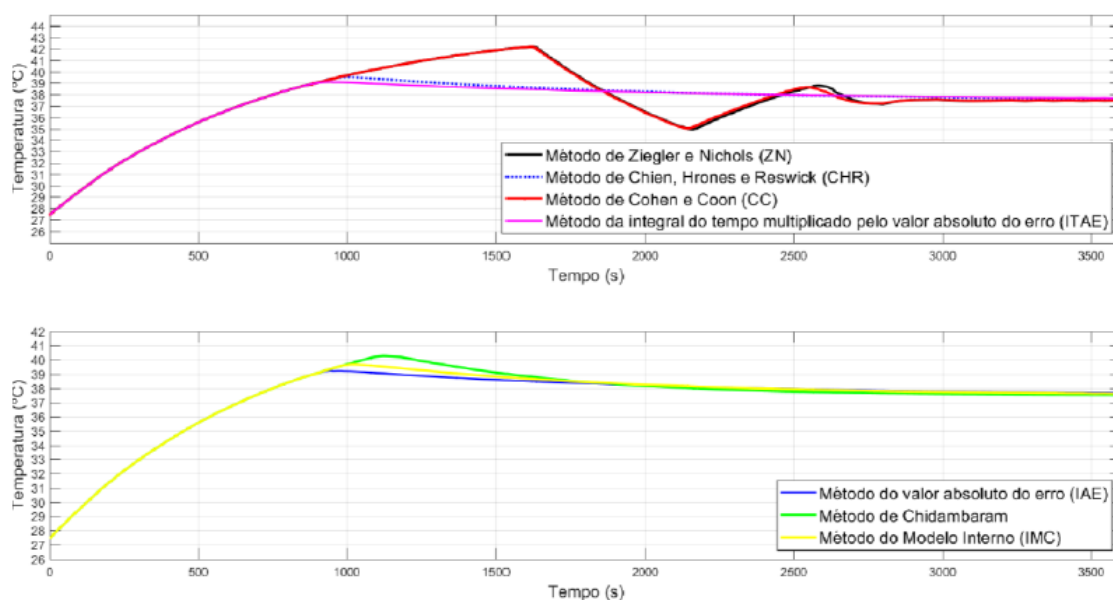


Fonte: Dos autores.

Após a simulação dos seis métodos, definiu-se que dois métodos seriam selecionados para experimentação com base no valor do sobressinal, ou seja, o

maior e o menor. Na figura 13 são apresentadas as curvas de resposta do controlador para cada método de sintonia, ela foi dividida em duas seções para melhor visualização.

Figura 13 – Curvas obtidas no simulink a partir de diversas técnicas de sintonia de controladores PI.



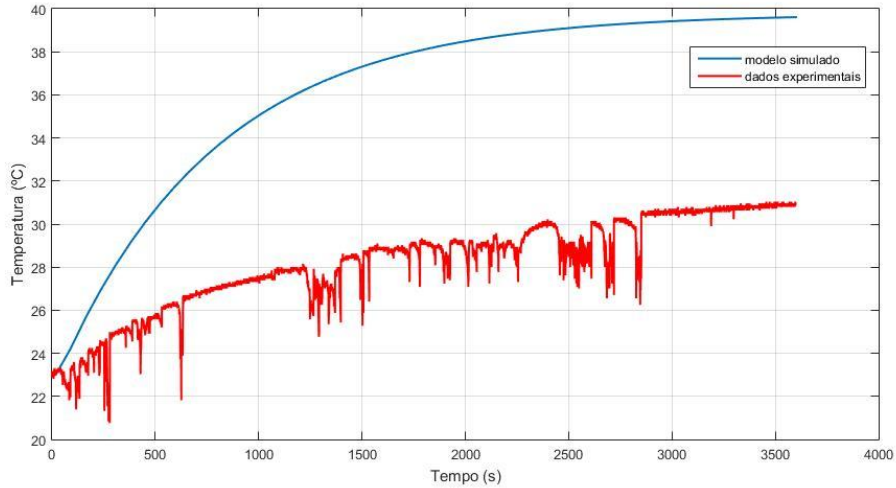
Fonte: Dos autores.

É possível observar que os métodos ZN e CC resultaram em um maior valor de sobressinal (OV) e tempos de subida (t_r) e acomodação mais longos (t_s). Já os métodos ITAE/IAE, CHR, IMC e Chidambaram apresentaram tempos de subida e acomodação menores. Ao comparar as diferentes sintonias, escolheram-se os métodos de ITAE e ZN, em razão do primeiro apresentar o menor sobressinal e o último, o maior, respectivamente, para obtenção da resposta experimental.

Como critério estabeleceu-se que os dois métodos de sintonia escolhidos atingissem o valor desejado de 37 °C dentro de uma hora. Para alcançar esse objetivo, foram conduzidos experimentos com o intuito de obter as respostas do sistema. A figura 14 mostra a resposta experimental e simulada obtida para a sintonia ITAE. Verificou-se que, nessa sintonia específica, a temperatura máxima alcançada ficou abaixo do valor desejado de 37 °C. Portanto, não pode ser adotada devido a esse resultado. O mesmo pode ser atribuído a diversos fatores

como: a troca de calor entre os ambientes interno e externo (laboratório com de ar refrigerado).

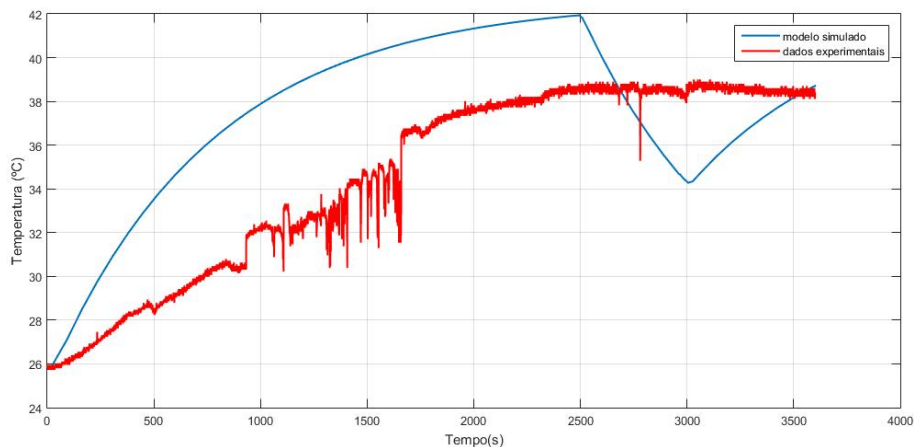
Figura 14 – Resposta da planta e simulada para o método ITAE. Em azul, o gráfico da temperatura obtido a partir do modelo, e em vermelho os dados experimentais.



Fonte: Dos autores.

A resposta da planta experimental e simulada à sintonia ZN é ilustrada na figura 15. Embora tenha alcançado a temperatura desejada no intervalo especificado, observou-se um sobressinal na faixa dos 38 °C, que se manteve por grande parte do tempo, ao invés de estabilizar próximo ao valor limite. Devido à sensibilidade do desenvolvimento embrionário a pequenas variações de temperatura, esse método não pode ser utilizado.

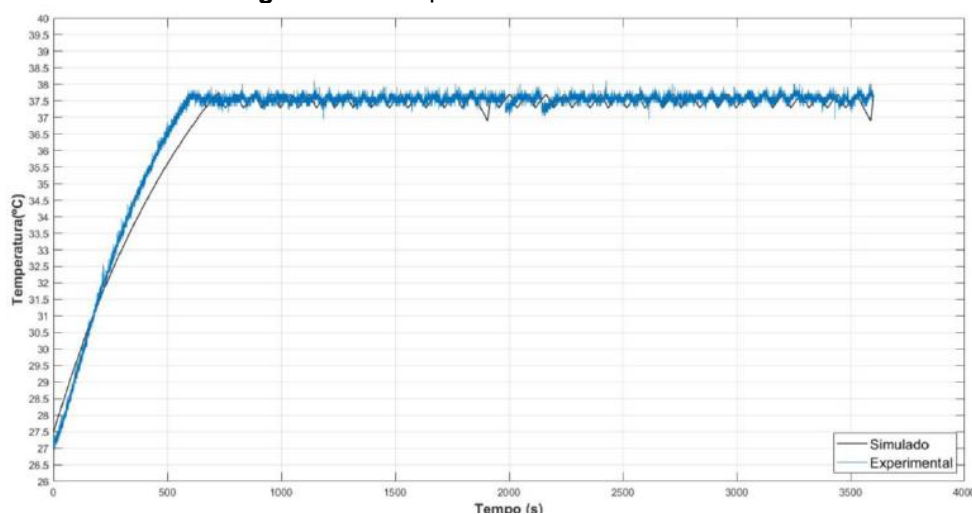
Figura 15 – Resposta da planta para o método Ziegler-Nichols. Em azul, o gráfico da temperatura obtido a partir do modelo, e em vermelho os dados experimentais.



Fonte: Dos autores.

Conforme exposto, os dois métodos de sintonia não atenderem de forma satisfatória ao requisito de temperatura com os componentes escolhidos no protótipo, optou-se pelo uso do controle ON-OFF com banda morta. Neste, o bloco PID é substituído por um relé, que limita as ações da porta 9 aos valores lógicos de 0 e 1 quando a temperatura está acima de 37,8 e abaixo de 37,4 °C. Na figura 16, é possível observar a resposta experimental e simulada do sistema ao controle ON-OFF.

Figura 16 – Resposta ao controle ON-OFF.



Fonte: Dos autores.

O controle ON-OFF apresentou um comportamento mais estável e próximo do valor desejado de temperatura, enquanto a sintonia ZN demonstrou maior variação e instabilidade ao redor do SP. Essa diferença sugere que o controle ON-OFF pode ser mais eficaz para atingir e manter a temperatura desejada de forma precisa e estável. Portanto, com base nessa análise comparativa, o método de controle ON-OFF se mostrou mais promissor para o sistema em questão.

Embora este tipo de controle tenha se mostrado a melhor escolha levando em conta a disponibilidade de materiais, verificou-se que o relé de estado sólido não é a opção mais adequada para o chaveamento de carga alternada (AC), apesar de não ser tão prejudicado por este tipo de estratégia, pois não envolve chaveamento mecânico (RAMOEL, 2019).

No controle de carga AC o mais indicado é a utilização de circuitos com tiristores que permitem controlar o ângulo de disparo em sincronia com a passagem de zero do sinal de tensão. Em relação à testes com ovos fecundados, devido a requisitos da comissão de ética da universidade onde o trabalho foi desenvolvido que não puderam ser satisfeitos, neste trabalho não foram realizados testes, sendo utilizado apenas para avaliação o controle do sistema de temperatura de chocadeiras automáticas.

Em relação aos valores, a chocadeira desenvolvida neste trabalho teve um custo de R\$ 342,77 reais. Foram pesquisados valores de 5 marcas diferentes a partir de uma busca na ferramenta google com as palavras-chave “Chocadeira elétrica”, com suas devidas características (Marcas de “A” a “E”), apresentados na tabela 7 abaixo. A variação de número de ovos não está relacionada diretamente ao valor, visto que o modelo de chocadeira “E” possui o dobro da capacidade do modelo “B”, porém o preço é praticamente o mesmo. Em relação à chocadeira mais barata “D”, a chocadeira desenvolvida neste trabalho teve um custo de R\$ 107,13 menor.

Tabela 7 – Valores de chocadeiras comerciais

Marca	Valor (R\$)	Capacidade máxima (número de ovos)
A	530,10	50
B	505,00	20
C	579,00	48
D	445,90	20
E	509,05	40

Fonte: Autores (2024).

5 CONCLUSÃO

Foi realizado um estudo sobre as abordagens existentes para o controle de temperatura em chocadeiras, sendo o controle ON-OFF o método mais utilizado. Embora seja de fácil implementação e demonstra eficácia, esse tipo de controlador pode reduzir a vida útil de alguns equipamentos. Devido às limitações em termos de equipamento disponíveis para o projeto, o trabalho

focou-se apenas no controle da temperatura, sendo assim, a umidade, que é também importante para este tipo de sistema não foi controlada, o que é uma limitação deste trabalho.

Buscando alternativas mais eficientes, recorreu-se à implementação de métodos de sintonia de controladores PI. Essas técnicas de sintonia são amplamente utilizadas nas malhas de controle de indústrias.

Dois métodos foram selecionados para serem testados experimentalmente de acordo com o valor do sobressinal: o método da integral do tempo multiplicado pelo valor absoluto do erro (ITAE) e o método de Ziegler e Nichols (ZN). No entanto, os resultados experimentais mostraram que nenhum dos métodos de sintonia foi capaz de se adequar corretamente ao controle da temperatura do protótipo da chocadeira. Os valores ficaram abaixo ou acima do desejado, o que prejudicaria o desenvolvimento embrionário adequado das aves.

Para trabalhos futuros recomenda-se: Testar as técnicas de sintonia experimentalmente que foram apenas simuladas, com valores de temperatura próximo a do laboratório; Variação do *setpoint* por meio de um potenciômetro, propiciando a incubação de outras espécies de aves; Aplicação de outras técnicas de controle; A implementação do controle da umidade, que não foi abordado neste estudo; Realização de testes experimentais com ovos de galinha, seguindo os padrões éticos vigentes, a fim de avaliar o desempenho do sistema em condições reais e de aplicação. O custo total da chocadeira desenvolvida foi de R\$ 342,77 reais, sendo um valor barato comparado o que se encontra no mercado, o que pode contribuir para o maior acesso à este tipo de dispositivo por pessoas de diferentes camadas sociais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, V. V. d.; CORIOLANO, D. L. Automação e monitoramento de uma chocadeira. Instituto Federal de Sergipe-IFS, 2018.

AMORIM, Marcos Antônio de Castro. Chocadeira automatizada microcontrolada de baixo custo. 2021. Trabalho de Conclusão de curso - Instituto Federal da Paraíba, Cajazeiras, 2021.

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa, TEIXEIRA, Herbert C. G. Controles típicos de equi-pamentos e processos industriais. 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

CAVALCANTI, Fernando Antônio Villar Ramalho. Avicultura caipira: estudo de mercado para a cadeia da galinha caipira. Natal: SEBRAE/RN, 2019, E-book.

ELETROGATE. Guia do motor de passo 28BYJ-48+Driver ULN2003. Disponível em < <https://blog.eletrogate.com/guia-completo-do-motor-de-passo-28byj-48-driver-uln2003/>>. Acesso em 20 jun. 2022.

KIATRONICS. 28BYJ-48–5V Stepper Motor <<https://www.mouser.com/datasheet/2/758/stepd-01-data-sheet-1143075.pdf>>. Acesso em 10 abr. 2022.

LAGE, Matheus Sales. Implantação de Sistema de Controle de Temperatura da Água Utilizando Trocador de Calor Aplicado em uma Planta Industrial. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Ouro Preto). João Monlevade, 2018.

LOPEZ, Jackelline Cristina Ost. Avicultura. Floriano/PI:UFRN, E-book, 2011.

MAGALHÃES, E. P. et al. Aplicação de métodos típicos industriais de sintonia de controladores PID em um protótipo de sistema térmico de baixo custo para ensino de sistemas de controle. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1.

NOGUEIRA et al. Desenvolvimento de chocadeira de baixo custo para produtores rurais com Arduino. Escola Regional de Informática de Goiás, 2019, Goiânia, Anais [...] Goiânia: [s.n.], p.275-281, 2019.

PERLIN, R. et al. Pequenos produtores na era da internet das coisas: Um sistema para automação e controle de uma chocadeira de baixo custo. Revista de Informática Aplicada, v. 15, n. 1, 2019.

PINTO, Luiz Fernando Teixeira e ALBUQUERQUE, Rômulo Oliveira. Eletrônica: Eletrônica Analógica. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Serie Eletrônica, v. 2)

RAMOEL. 2019. Disponível em < [SAGRILO, Luiz Gustavo, ROSA, Guilherme Américo, TSUKADA, Jackson. Medição de temperatura em chocadeiras utilizando controlador PID. Revista Missioneira, v. 25, n. 1, 2023,](https://blog.rhmateriaiseletricos.com.br/como-funciona-um-rele-de-estado-solido/#:~:text=Enquanto%20os%20rel%C3%A9s%20eletromec%C3%A2nicos%20s%C3%A3o,mais%20resistentes%20as%20oscila%C3%A7%C3%B5es%20mec%C3%A2nicas.> . Acesso em 04 mar. 2023.</p></div><div data-bbox=)

SANTOS, Maria Gorete Pinto; JUNIOR, Gilson Fernandes Braga. Desenvolvimento de um banho termostático laboratorial com arduino uno e ambiente de desenvolvimento Simulink. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 13, n. 4, 2021.

THERMISTOR, datasheet. Disponível em: <https://www.tme.eu/Document/9d2eb9f3eda897a378e818dbe183c915/NTCM-10K-B3380.pdf>. Acesso em 27/05/2024.

VIOLA, T. H. et al. Considerações técnicas sobre a incubação de ovos de galinhas. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2019.

ZÓFOLI, L. D. Chocadeira automatizada utilizando arduino com monitoramento remoto. Uni-versidade Federal de Santa Maria, 2022.