

# Desenvolvimento de um sistema embarcado para operação de uma incubadora de ovos

SILVA, João Vytor Dantas  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, Santa Catarina, Brasil  
joao.vd25@aluno.ifsc.edu.br

ANDRADE da SILVA, Eder  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, Santa Catarina, Brasil  
eder.silva@ifsc.edu.br

RODRIGUES SANTOS, Fernando  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, Santa Catarina, Brasil  
fernando.rodrigues@ifsc.edu.br

**Resumo**— Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma incubadora de ovos de aves que possui baixo custo, capaz de automatizar os processos de incubação em nível de produção industrial. Para tal fim, foi desenvolvido um sistema embarcado composto de quatro subsistemas, sendo o primeiro o software de controle automático de temperatura e umidade, através de uma abordagem de controlador PI (Proporcional-Integral), e também do tempo decorrido de incubação; o segundo é a IHM que permite a interação do usuário e a visualização das informações da incubadora; o terceiro é o sistema de viragem automática dos ovos; e o quarto é o sistema de controle de fluxo de ar para trocas gasosas com o ambiente. Para a validação do sistema, foi realizado um processo de incubação completo, sendo registrados os valores dos principais parâmetros, destacando-se para análise as informações de temperatura ao longo do processo e o cálculo dos índices de eclodibilidade. Com base na análise dos dados, o sistema indicou uma capacidade de assegurar um alto percentual de eclodibilidade, mesmo sabendo que esse fator depende dos fatores de condução de todo o processo. Logo, o sistema desenvolvido atende às necessidades de pequenos e médios produtores de aves.

**Palavras-Chave:** Incubadora de ovos, Aves, Sistema Embarcado, ESP32, Controlador PI.

## I. INTRODUÇÃO

Os primórdios da avicultura no Brasil se deram de forma familiar: tal modelo ainda existe em várias regiões do país. O excedente da produção de subsistência logo se tornou um mercado antes mesmo dos anos de 1930. Durante este período o setor ganhava forças com a iniciativa privada, vinda principalmente do Sudeste, especialmente do estado de São Paulo [1]. Durante os anos que se seguiram, a produção deste mercado foi se transformando e modernizando, devido à grande demanda já existente [2].

Atualmente, segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA), o Brasil é o segundo maior produtor de frangos do mundo. Dados do ano de 2021 mostram que no país foram produzidos cerca de 14.329 milhões de toneladas de carne de frango, das quais 4.610 milhões de toneladas foram exportadas para 151 países, além de cerca de 15.691 mil toneladas de material genético avícola exportados para 69 países (ABPA, 2022). A exportação de carne de frango no ano de 2022 renovou o recorde, apesar do cenário internacional de pós-pandemia [3].

Para a avicultura acompanhar essa grande demanda,

tornou-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que permitissem a melhoria dos seus processos. Neste sentido, a incubação artificial foi o principal fator no desenvolvimento da produção de ovos, uma vez que se encontra no início do processo e tem influência nas demais etapas da produção de aves [4]. Assim, a incubação passou de um setor importante, para uma etapa estratégica dentro de todo processo avícola [5].

A incubação é o processo fundamental no desenvolvimento do embrião até se tornar um pinto, sendo necessário passar por determinadas condições de temperatura e umidade, que são específicas para cada espécie de ave, a fim de garantir o seu desenvolvimento. Tal processo pode ocorrer de forma natural, no caso em que a ave os aquece, ou com a utilização de equipamentos, conhecidos como incubadoras ou chocadeiras [6].

A função da incubadora é proporcionar aos ovos condições específicas de temperatura, umidade relativa, fluxo de ar e trocas gasosas. Quaisquer diferenças desses valores para o referencial de uma espécie, combinado com o seu tempo de duração, podem resultar na inviabilização do desenvolvimento dos ovos e aumento da mortalidade. Deste modo, a utilização destes equipamentos tem como objetivo aumentar a eclosão, aperfeiçoar a qualidade dos pintos e garantir a sincronização da eclosão [4]. Contudo, a incubação não pode alterar fatores que interferem no produto final, como por exemplo, a genética das aves, a nutrição e, principalmente, o manejo da granja. Assim, deve existir uma combinação dos processos de produção de ovos embrionados e de incubação [5].

Desta forma, as chocadeiras comerciais têm a função de maximizar a produtividade de pintos e reduzir os custos de utilizar a incubação natural, ou seja, diminuir a necessidade de intervenção humana e garantir a qualidade do processo. A decisão da aquisição de uma incubadora com mais recursos técnicos é influenciada em grande parte pelo preço do equipamento em comparação a capacidade financeira do avicultor, pois quanto mais recursos ela possui, mais cara ela se torna e, em paralelo, apresentam um maior nível de eficiência [6].

Devido aos preços elevados desses equipamentos agrícolas para incubação artificial, os pequenos e médios produtores acabam por recorrer a outras opções, como incubação natural ou chocadeiras de fabricação caseira. Porém, tais métodos não são tão eficientes e ainda exigem que os usuários tenham que intervir no processo, o que

influencia tanto nos custos de produção quanto no nível de eficiência do mesmo. E isso dificulta o desenvolvimento do mercado avícola [6].

Ao realizar pesquisas bibliográficas sobre o tema, foi possível encontrar alguns projetos que tratam do desenvolvimento de incubadoras para aves, possuindo dois principais eixos de aplicação, a integração com IoT (Internet das Coisas) e a utilização de energia solar. Entretanto, cada trabalho foca em um problema específico das incubadoras, além de utilizarem abordagens diferentes para o controle e aquisição de dados.

Desta forma, a partir da demanda externa de uma empresa sul catarinense que desenvolve equipamentos para incubação artificial, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma incubadora, tendo como foco os pequenos produtores de aves e a produção de subsistência.

Este artigo é estruturado da seguinte forma: a seção II apresenta a metodologia utilizada no projeto, a seção III apresenta os resultados obtidos, e na seção IV apresenta as conclusões.

## II. METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento do projeto foi dividida em etapas conforme fluxograma da Figura 1.

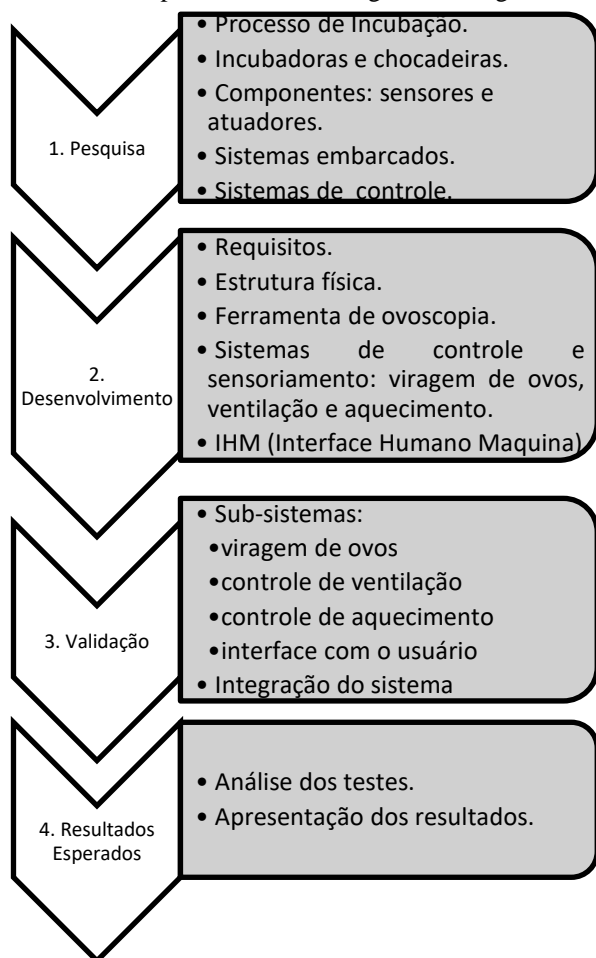


Figura 1. Etapas de desenvolvimento do projeto.

O fluxograma apresenta as etapas que foram seguidas, sendo dividido em quatro partes, consistindo de: pesquisa,

desenvolvimento, validação e resultados esperados.

Na primeira etapa, efetuar uma pesquisa científica sobre os principais temas relacionados ao projeto, sendo eles: incubadora e o processo de incubação, variáveis exigidas para a incubação de ovos ser mimetizada e o controle de uma chocadeira automática. Além dos sensores, atuadores e sistema de controle necessários para esse tipo de aplicação, Sistemas Embarcados e controladores PI.

Na segunda etapa, projetar e implementar todos os sistemas da incubadora, desde a estrutura física, sistema de viragem de ovos, sistema de ventilação, sistema de aquecimento, sistema de controle e sensoriamento, até a IHM (Interface Humano Máquina), além da ferramenta de ovoscopia, responsável pela visualização do embrião dentro do ovo.

Na terceira etapa, realizar os testes para validação dos sistemas que foram desenvolvidos e implementados na etapa anterior, primeiro de forma separada e depois em conjunto. Para isso, se verificou o funcionamento individual de cada sistema para garantir a sua correta execução, bem como a integração dos sistemas para a realização de um ciclo completo de incubação.

Na quarta etapa, efetuou-se a avaliação dos resultados obtidos, com a análise do desempenho da incubadora automática para realizar um processo de incubação completo.

## III. RESULTADOS OBTIDOS

### A. Pesquisa

#### 1) Revisão bibliográfica

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o processo de incubação e incubadoras, os processos e variáveis exigidas para os ovos serem mimetizados e controlados pela chocadeira, bem como os sensores e atuadores necessários, além dos conceitos de sistemas embarcados e teoria de controle.

#### 2) Seleção de componentes

Embasado na pesquisa bibliográfica, escolheu-se os componentes conforme as necessidades do processo de incubação, sem perder o foco em ser um produto viável comercialmente.

Para realizar o controle do sistema foi selecionada uma placa de controle Kincony KC868-A6 (Figura 2), que utiliza o microcontrolador ESP32, com seis entradas digitais opto isoladas, quatro entradas analógicas de 0-5V, duas saídas analógicas (DAC) 0-10V, seis relés 10A 220V (NO, COM NC), dois conectores para sensores, um conector serial, um conector I2C, um RTC DS1307 e uma entrada USB/CH340 [8].

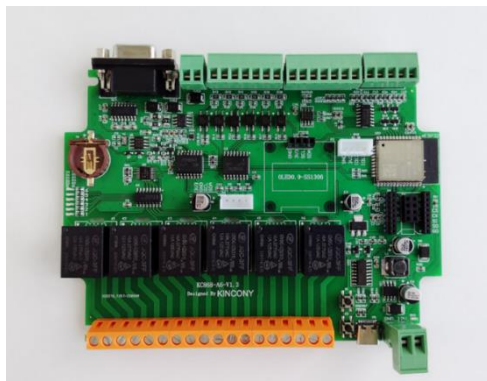


Figura 2. Placa KC868-A6 [8].

Para realizar os movimentos de viragem dos ovos selecionou-se um motor síncrono, que é um atuador rotativo de velocidade fixa independente da carga, desde que esteja dentro do limite [9]. O escolhido foi o motor Galanz Sm-16E (Figura 3), com alimentação de 220/240VAC, frequência de operação de 50/60Hz, rotação de 5/6rpm e potência de 3W [10].



Figura 3. Motor síncrono [10].

Para a aquisição dos valores da temperatura e umidade foi selecionado o sensor digital DTH22 (Figura 4), que emprega um sensor de umidade capacitivo e um termistor, capazes de medir o ar em volta, emitindo um sinal digital em seu pino de dados [11].

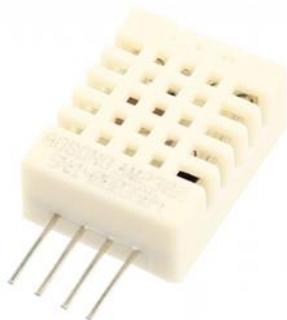


Figura 4. Sensor DHT22 [12].

Outros componentes selecionados foram, uma ventoinha de 120x120 mm, uma lâmpada Bulbo LED 4.8W branca, um display LCD 20x4, cinco sensores de fim-de-curso, um relé de estado sólido e resistência de aquecimento 220W. A estrutura física da incubadora foi construída com placas de MDF resistentes a umidade e placas de acrílico.

## B. Desenvolvimento

### 1) Requisitos

Adotou-se os seguintes pré-requisitos para a realização do projeto:

- Ter um sistema de controle de temperatura, umidade e tempo de incubação de forma automática para cada espécie de ave.
- Sistema de viragem automática dos ovos.
- Ferramenta para ovoscopia, para visualizar o embrião dos ovos.
- Interface IHM para a seleção dos tipos de ovos e visualização das variáveis do sistema.
- Salvamento automático dos dados da incubadora em memória local.
- Utilização de materiais e métodos que permitam a produção em escala em nível industrial e com baixo custo.

### 2) Projeto de Hardware e Software

As figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente as arquiteturas de hardware e software.

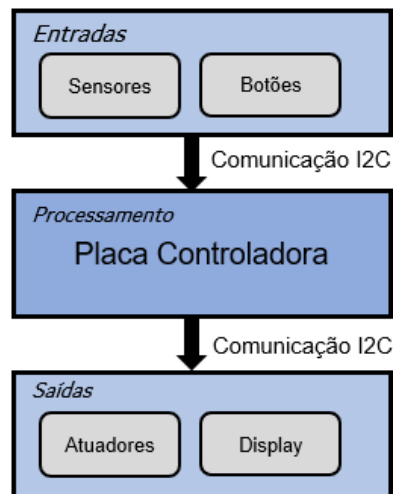


Figura 5. Arquitetura de Hardware.

O hardware concentra o controle da incubadora a partir da placa escolhida, devido a aspectos técnicos de montagem do produto. Desta forma se tem a placa que se comunica com as entradas, os sensores e botões, e as saídas, que são os atuadores e o *display*.

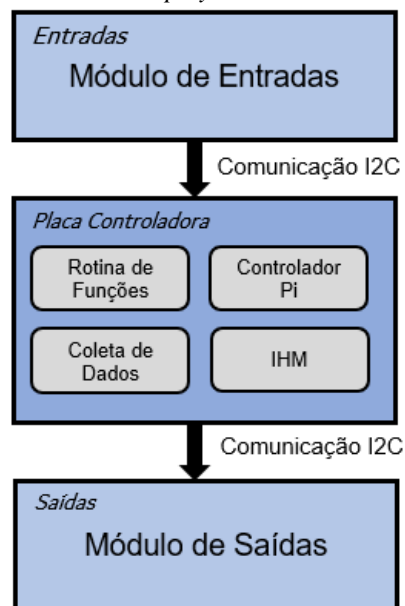


Figura 6. Arquitetura de Software.

O software do sistema embarcado foi pensado para ser de forma modular, a fim de facilitar o desenvolvimento e que possa garantir um melhor desempenho no controle do processo.

### 3) Sistema de viragem

Segundo Mesquita (2011), o projeto da estrutura de uma incubadora deve permitir o movimento de rotação com os ângulos entre 20° a 45° no plano horizontal. Porém, na prática são utilizados ângulos de 45° ±5°, que foi utilizado no projeto, e a rotação deve ser realizada no mínimo 24 vezes ao dia [5].

Seguindo essas recomendações, projetou-se o mecanismo com o auxílio de uma ferramenta de desenho assistido por computador (CAD), conforme Figura 5.

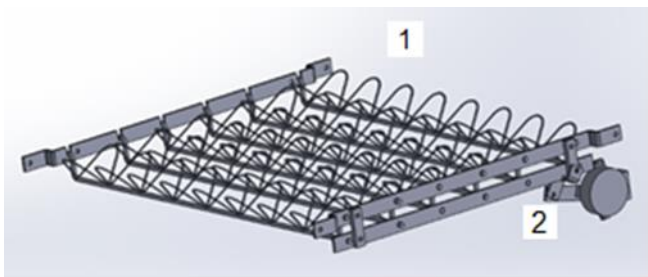


Figura 5. Projeto de sistema de viragem.

O sistema automático de viragem dos ovos consiste em duas principais partes, sendo a primeira o suporte para os ovos (1), que possui um formato padrão para que os mesmos fiquem perpendiculares à horizontal, e esse suporte pode ser trocado conforme necessidade, se ajustando ao tipo de ovo. A sua capacidade varia conforme a espécie de ave, por exemplo, é capaz de comportar até cem ovos de galinha ou dois ovos de avestruz. A segunda parte é o mecanismo de viragem (2), constituído de duas barras verticais, ligadas a uma manivela, esta é acoplada ao motor síncrono, que realiza o movimento de rotação de toda a estrutura.

Emprega-se para este sistema um sensor fim de curso, que foi posicionado em um ângulo de 45°, para ser o ponto de referência do sistema.

#### 4) Sistema de ventilação

Esse sistema deve permitir controlar a abertura e fechamento das entradas de ar da incubadora, levando em consideração o percentual de abertura. De modo a poder realizar as trocas gasosas e o controle da umidade do ar, caso a mesma exceda o ideal, o sistema atua abrindo a ventilação na porcentagem e intervalo de tempo corretos, realizando a circulação do ar em ambos os casos.

Com o auxílio de uma ferramenta de desenho assistido por computador (CAD), o mecanismo foi projetado (Figura 7).

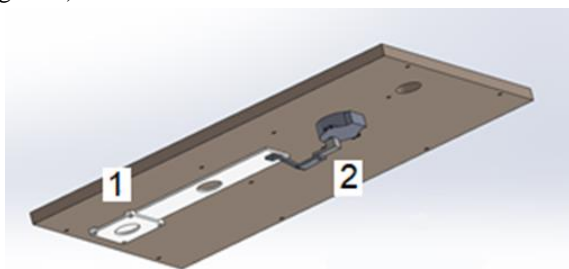


Figura 7. Projeto do sistema de ventilação.

A composição da estrutura se divide em duas partes: a primeira (1) é a estrutura que abre e fecha os furos da parte superior da incubadora, a segunda (2) é a junção da manivela com o motor síncrono, que permite realizar um movimento linear da primeira estrutura.

Na ponta da primeira estrutura (1) posicionou-se uma chave fim de curso que serve como ponto de referência para o sistema. Além de serem posicionados os furos, para acoplar a ventoinha que deve realizar a troca de ar do interior da incubadora.

#### 5) Ferramenta de ovoscopia

A ferramenta de ovoscopia (Figura 8) consiste em um disco com tamanhos de perfurações diferentes, as quais servem de apoio para os ovos.

Para complementar a ferramenta de ovoscopia na parte interna da chocadeira se deve inserir uma lâmpada, de forma que a luz atravesse o furo dos dois objetos e permeie o ovo.

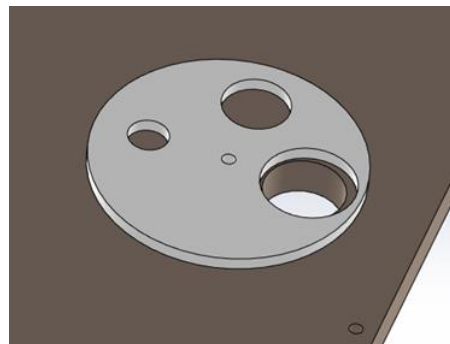


Figura 8. Projeto da ferramenta de ovoscopia.

#### 6) Estrutura do software embarcado

Com o intuito de facilitar o desenvolvimento do sistema embarcado da incubadora foi elaborado o diagrama da Figura 9. A lógica de funcionamento consiste em realizar a leitura das entradas e saídas, e, posteriormente, executar as operações de controle do sistema.

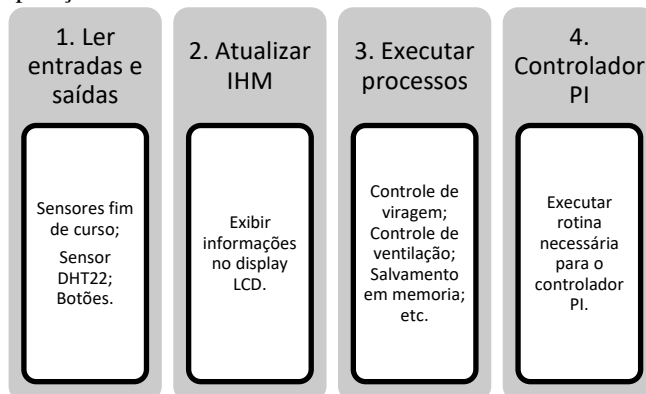


Figura 9. Diagrama do sistema de controle.

#### 7) IHM

Para interação do usuário com o sistema, foi desenvolvida uma IHM composta por um display LCD que exibe as informações do sistema, além de quatro botões, sendo um para selecionar (1) e outro para cancelar (2) as opções, assim como um para avançar (3) e outro para retornar (4). Além destes, há um botão para ligar/desligar (6), um botão para ligar a ovoscopia (5) e um fusível de segurança (7) (Figura 10).

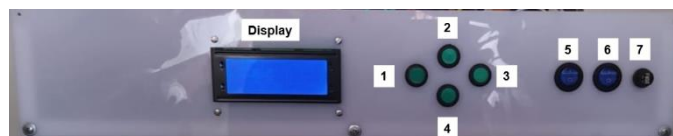


Figura 10. Design da IHM.

A interface possui um menu, conforme o diagrama da Figura 11. O menu principal apresenta opções, com uma

hierarquia de sub menus, em que o usuário pode pré-definir as variáveis do processo, escolher o tipo de incubação e acompanhar os principais parâmetros.

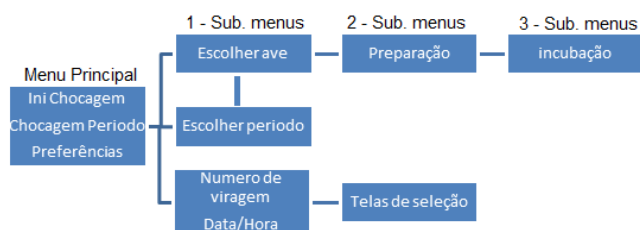


Figura 11. Diagrama de menus da IHM.

### 8) Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento da incubadora é composto por uma resistência elétrica, que é acionada por um relé de estado sólido devido ao seu baixo tempo de resposta.

Nesse sistema foi projetado um controlador do tipo PI (Proporcional e Integral). Para a sua implementação foi utilizada a biblioteca Arduino PID, a qual permite a criação de diferentes tipos de controladores [15].

A sintonia do controlador PI foi realizada com o auxílio do software MATLAB, por meio da estimação da planta com a curva de temperatura em um período de dez minutos de coleta de dados. Em seguida, foi retirada a função de transferência e calculados os valores dos termos proporcional e integral pelo método de Zigle-Nichols.

### 9) Implementação do software embarcado

A programação do sistema embarcado foi realizada no Arduino IDE, que possui compatibilidade com o microcontrolador ESP32. Além de possuir uma grande quantidade de bibliotecas para o desenvolvimento.

A partir da análise da placa KC868-A6, dos seus Circuitos Integrados (CI) e as recomendações do fabricante [8], definiu-se o uso da biblioteca PCF8574, que controla os CIs de mesmo nome, podendo ler e manipular o estado das portas digitais [16].

Para o controle do Real Time Clock (RTC), com CI DS1307, foi utilizada a biblioteca DS1307ESP, que permite inserir os pinos de SDA e SCL [17] da comunicação I2C. O RTC é aplicado para controlar o tempo das atividades da incubadora de forma precisa. E a biblioteca Wire permite acessar sua memória não volátil [18], sendo capaz de calcular o tempo que a incubadora ficou desligada caso falte energia durante o processo de incubação.

O armazenamento dos dados foi realizado na memória não volátil do ESP32, com auxílio da biblioteca EEPROM, que permite a leitura e escrita de dados [19].

Por fim, para o controle dos eventos do programa foi utilizada a biblioteca TIKER, que permite criar interrupções com um intervalo definido [20], que pode ser ajustado conforme a necessidade, de forma a executar os blocos de código da Figura 9 separadamente, sem que um interfira diretamente nos outros.

### C. Validação

A validação dos sistemas desenvolvidos foi realizada

primeiramente de forma individual e, em seguida, de forma conjunta.

### 1) Sistema de viragem

Após a confecção do projeto do sistema de viragem em alumínio e a sua instalação na estrutura da incubadora, iniciou-se o processo de avaliação.

Testou-se a capacidade de rotacionar a estrutura da posição inicial em 45° virado para o fundo da incubadora até o lado oposto, também com inclinação de 45°, mas virado para frente da incubadora. A implementação do controle deste sistema foi realizada baseada no tempo de rotação do motor síncrono. Além de verificar seu acionamento em intervalos de tempo definidos e a repetibilidade dos movimentos realizados.

Percebeu-se que a velocidade deste movimento foi lenta e gradual, conforme deveria ocorrer a movimentação da estrutura, além de observar que não ocorreu choque entre a estrutura e os ovos.

### 2) Sistema de ar

A estrutura de abertura e fechamento do sistema de ventilação foi confeccionada utilizando acrílico e alumínio para as partes 1 e 2, respectivamente, conforme figura 6.

O sistema inicia fechado, com o sensor fim de curso acionado, sendo este ponto definido como inicial. A partir deste ponto, estabeleceu-se um tempo de 5 segundos para abertura completa do compartimento. Assim, o controle deste sistema funciona com acionamentos para aberturas percentuais, de 0 a 100%, em intervalos predeterminados.

Desta forma, testou-se a capacidade do sistema de realizar o movimento de forma correta, bem como a repetibilidade em abrir e fechar as entradas de ar em 50% e 100%, por intervalos de tempo predeterminados.

Por fim, foi avaliada a capacidade do ventilador em realizar a circulação de ar dentro da incubadora, ao se abrir as entradas de ar e acompanhar a queda de temperatura e humidade, o que indica a circulação do mesmo.

### 3) Sistema da IHM

A interface com usuário foi construída em uma placa de acrílico, onde foram fixados os seis botões e o display LCD.

Verificou-se a capacidade da IHM apresentar os dados da incubadora e a facilidade de operação. Para isso, realizou-se teste em bancada para averiguar a navegabilidade do menu, ou seja, como o equipamento desenvolvido se apresentava ao operador.

### 4) Controlador PI

A partir dos valores iniciais dos termos proporcional e integral calculados através do software MATLAB, iniciou-se uma série de testes em bancada para o ajuste destes valores.

O ajuste do controlador segue três critérios de projeto:

1. Não deve ter um overshoot superior a um grau Celsius.
2. A variação de temperatura deve ser de mais ou menos zero vírgula um grau celsius (0,1 °C).

3. O tempo de acomodação do sistema deve ser lento.

Com base no trabalho de NUNES [22] e nestas especificações, fixou-se o valor do termo integral, buscando um valor para o termo proporcional ideal, já que os fornecidos pelo MATLAB não atenderam todos os requisitos estabelecidos.

Assim, analisou-se a curva de subida do controlador PI, verificando o overshoot e o tempo de acomodação, bem como a capacidade de se manter no setpoint, ajustando os valores para alcançar o valor desejado. Em seguida, para ajuste final, avaliou-se a capacidade de resistir a perturbações, como a abertura da saída de ar ou abertura da porta após a acomodação do sistema, averiguando-se a existência de overshoot.

#### 5) Desempenho do controle de temperatura e umidade

Para testar a capacidade da incubadora em controlar a temperatura e a umidade, decidiu-se enviar os valores coletados pelo sensor para um banco de dados, desta forma pode-se comparar esses valores com os de setpoint.

Foi utilizada a plataforma em nuvem Firebase, que possui um serviço de armazenamento chamado Firebase Database e utiliza comunicação via HTTP - Protocolo de Transferência de Hipertexto (HyperText Transfer Protocol) - um protocolo de comunicação utilizado na internet [21]. Assim, os dados do microcontrolador são transferidos para o banco de dados na nuvem via rede de comunicação WiFi.

#### D. Resultados Esperados

##### 1) Análise final do funcionamento da incubadora

Como já mencionado anteriormente, o processo de incubação não é capaz de alterar certos fatores que são de natureza genética e interferem no processo. Já os fatores de manejo dos ovos podem ser evitados.

Logo, delimitou-se a avaliação de eficiência da incubadora na sua capacidade de seguir e manter os valores ideais de temperatura e umidade no processo de incubação.

Para este propósito, foi necessário realizar uma incubação prática de ovos, que fornecerá o percentual de eclodibilidade.

A eclodibilidade é o meio pelo qual as incubadoras são avaliadas. O seu percentual pode ser calculado por meio de duas equações [7]:

$$\text{Eclodibilidade} = \frac{N^{\circ} \text{ Nascimentos}}{N^{\circ} \text{ ovos incubados (Total)}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Eclodibilidade} = \frac{N^{\circ} \text{ Nascimentos}}{N^{\circ} \text{ ovos incubados (Férteis)}} \times 100 \quad (2)$$

Neste trabalho será empregada, para fins avaliativos somente a segunda equação, já que o objetivo é trabalhar somente com ovos férteis, sendo assumido que todos os ovos entregues pelos fornecedores ou utilizados pelos avicultores estejam devidamente galados.

Assim, a análise do projeto pautará nestes dois fatores: a capacidade da incubadora de manter os valores ideais de

temperatura e umidade, além da eclodibilidade.

##### 2) Apresentação dos resultados e conclusões

A abordagem para a apresentação dos resultados seguirá o mesmo apresentado na análise do desempenho do controle, utilizando os dados do processo de incubação.

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos após a análise dos testes para os sistemas desenvolvidos da incubadora. Serão discutidos os resultados individuais de cada sistema e, posteriormente, a junção com os demais.

#### A. Estrutura da incubadora

O sistema de viragem obteve êxito em realizar os movimentos, partindo do ponto inicial a 45°, rotacionando 90° para a segunda posição. O movimento realizado ocorreu de forma lenta e suave, garantindo que não ocorresse choque entre a estrutura e os ovos, evitando danificar os mesmos. Além disso, ele foi capaz de movimentar repetidas vezes.

Esse sistema atende os requisitos, sendo de fácil manutenção, visto que possibilita a retirada somente do motor para manutenção ou o desmonte da estrutura de rotação, o que viabiliza uma melhor higienização após o ciclo de incubação. Além disso, permite a troca dos suportes para os ovos, ampliando a sua capacidade de trabalhar com ovos de várias espécies de aves, o que agrega mais valor ao produto final.

O sistema de ventilação foi capaz de realizar a abertura e fechamento das entradas de ar nos dois valores pré-definidos de 50 e 100%, com uma boa precisão. A ventoinha utilizada realizou as trocas gasosas da maneira esperada, de forma a renovar o ar no interior da incubadora, além de promover a homogeneização da temperatura. Obtendo êxito também em controlar a umidade, abrindo as entradas da ventilação caso a mesma se encontre 5% acima do ideal, realizando a troca do ar interno mais úmido pelo externo relativamente mais “seco”.

A estrutura desenvolvida permite a troca de qualquer um dos componentes de forma fácil, podendo ser realizada retirando-se a parte superior ou os suportes dos ovos. Além de permitir a limpeza dos mesmos se necessário.

O sistema de aquecimento gerou o calor necessário para aquecer a incubadora e manter a temperatura estável. Além disso, possui um arranjo que facilita a sua substituição, caso necessário.

A IHM apresentou as informações de forma simples e clara e os menus permitem acesso às informações e escolha das variáveis do processo. Os botões conseguem executar as ações sem erros, a seleção das opções e a atualização do display fica em torno de 500 milissegundos, o que não gera atrasos perceptíveis para o usuário.

Durante o período de incubação, os dados são mostrados de forma clara e objetiva, exibindo o tipo de ave, o dia atual de incubação, se o equipamento foi desligado ou teve uma parada inesperada, a ocorrência de elevações de temperatura e umidade, além de falhas do sensor de temperatura e umidade. Dessa forma, auxilia o operador nas tomadas de decisão.

Após a comprovação da eficiência das soluções de forma individual, integrou-se todos os sistemas do equipamento para operação completa, tanto em condições normais de operação, quanto para possíveis situações adversas. Assim, pode-se concluir que o equipamento opera dentro dos requisitos estabelecidos.

## B. Sistema embarcado

O software desenvolvido para o controle da incubadora, seguiu o previsto na Figura 09, tendo quatro funções principais que são chamadas em um mesmo intervalo de tempo. Desta forma, pode-se definir um tempo ideal para cada uma: de forma independente.

A primeira função tem como objetivo realizar as leituras das entradas e saídas, fornecendo as informações necessárias para as demais partes do software. Caso aconteça alguma falha na leitura dos dispositivos, esta função avisa o usuário e mantém os últimos valores lidos.

A segunda função realiza o controle da IHM, que como já mencionado anteriormente, apresentou um bom funcionamento prático.

A terceira função é encarregada de executar todos os processos, além de realizar o armazenamento dos dados do processo de incubação em memória.

A quarta função realiza o cálculo e atualização da saída que gera a ação do controle de temperatura do processo de incubação.

As duas primeiras funções são chamadas a cada intervalo de tempo de 125 milissegundos. A terceira função a cada 500 milissegundos e a quarta função a cada um segundo.

Assim, o software embarcado obteve êxito em seu funcionamento no sistema, o que facilita as tomadas de decisão do usuário, além do auxílio no gerenciamento do processo de incubação, armazenando dados primordiais para continuação do processo em caso de falta de energia.

## C. Desempenho no controle

A curva de subida até o setpoint apresentou um overshoot máximo de  $0,2^{\circ}\text{C}$ , em que a variação da temperatura fica entre  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  do desejado e por fim seu tempo de acomodação ficou em um tempo apropriado em torno de 20 minutos, considerado um tempo de acomodação lento.

O controlador resistiu bem a perturbações como a abertura da porta ou da ventilação, que são ações presentes durante a incubação principalmente a segunda, já que ocorre regularmente sendo necessário que o controlador seja capaz de lidar de forma a não quebrar nenhum critério de projeto.

## D. Pré-teste de incubação

Antes de iniciar o teste final, realizou-se um pré-teste de validação, para afirmar a confiabilidade do equipamento, de forma a antecipar qualquer anomalia ou defeito da chocadeira que possa interferir no teste final, buscando minimizar eventuais perdas.

O pré-teste consistiu em ligar o equipamento por 3 dias, simulando o processo de incubação, com o equipamento enviando os dados, em um intervalo de 10 minutos ao Firebase, com informações do número de viragens realizadas, dos valores da temperatura e da ocorrência de algum erro.

Os dados, foram trabalhados e são apresentados na Figura 12.

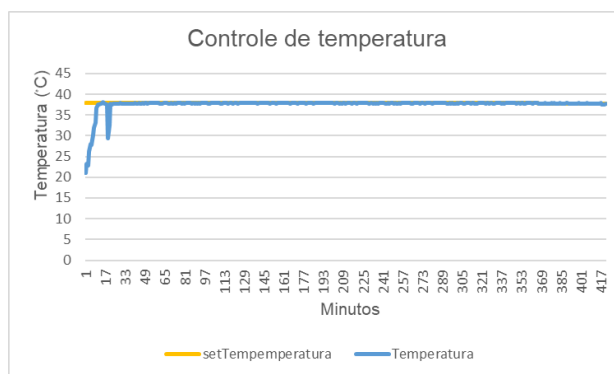


Figura 12. Gráfico controle de temperatura.

Os dados obtidos, evidenciam que a média das medições ficou em  $37,9^{\circ}\text{C}$ , foi o setpoint definido para estes três dias. A variação da temperatura ficou em torno de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , dentro da margem desejada. E o desvio padrão amostral ficou em aproximadamente  $0,5^{\circ}\text{C}$  - tendo em vista que o valor das medições de temperatura leva em conta o aquecimento a partir da temperatura ambiente.

Também foi observado que: o número de viragens de ovos foi realizado correntemente, a troca do número do dia ocorreu em torno do mesmo horário e a abertura da ventilação ocorreu na proporção e intervalos corretos.

Assim, a chocadeira está apta para realizar um processo de incubação com ovos de uma espécie de ave, como por exemplo, de galinha, que leva 21 dias para completar o ciclo completo.

## E. Incubação

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela incubadora ao realizar um processo de incubação de 39 ovos de galinha (Figura13).



Figura 13. Incubação dos ovos.

Durante todo o ciclo de incubação, o equipamento enviou as informações em intervalos regulares de 10 minutos ao Firebase, sendo elas, o dia correspondente da incubação, o horário da medição, os valores da temperatura e se ocorreu algum erro.

Os valores registrados no banco de dados, foram utilizados na elaboração do gráfico apresentado na Figura 14, para a avaliação do desempenho no controle da temperatura durante todo o processo.

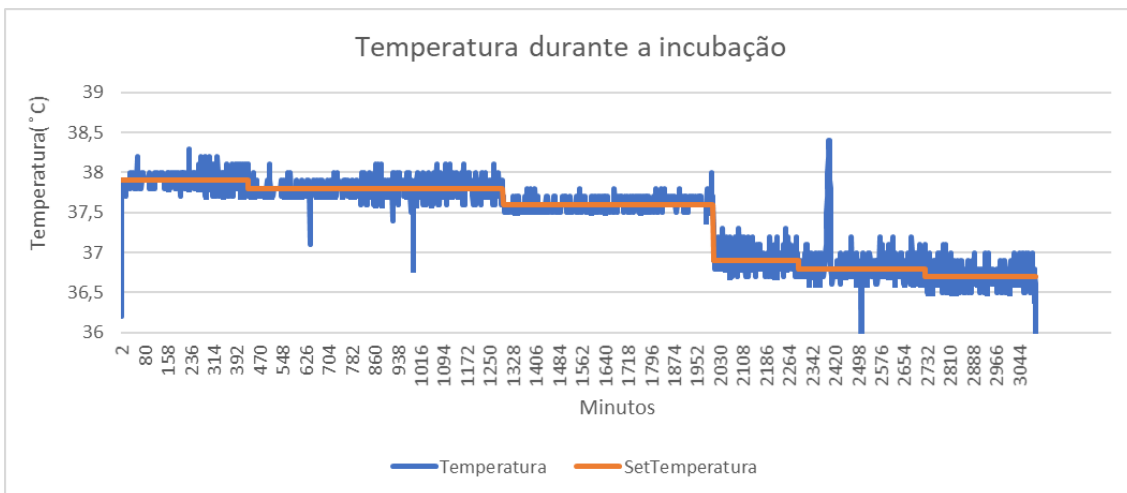


Figura 14. Temperatura durante a incubação.

A temperatura ao longo do processo de incubação apresentou uma variação dentro da faixa esperada, permanecendo em grande parte entre  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  do setpoint.

Em alguns momentos tal valor ficou em torno de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  ou  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ , o que ainda assim são valores que não comprometem, uma vez que os processos metabólicos das aves, que ocasionam na produção de calor, variam conforme a incubação avança [2].

Em alguns momentos a variação da temperatura foi maior, devido a abertura da porta para a realização das atividades de incubação, tais como, retirada da grade e ovoscopia.

Ao final dos 21 dias, gerou-se os nascimentos dos pintinhos, como pode ser observado na Figura 15.



Figura 15. Nascimentos após 21 dias de incubação.

Dos 39 ovos postos para a incubação no início do processo, eclodiram 28 pintinhos. Depois dos nascimentos, é necessário realizar o embriodiagnóstico, procedimento que consiste na quebra dos ovos não eclodidos para a análise de seus conteúdos, tomando nota das possíveis causas das mortes dos embriões [23].

Deste modo, tal procedimento auxilia na identificação e rastreio das possíveis causas das falhas de eclosão durante o processo, a fim de colaborar nas medidas de prevenção e perdas. Essa análise permite concluir se o problema advém da nutrição das matrizes, manejo dos ovos ou falhas no equipamento de incubação [23].

Os resultados do embriodiagnóstico foi realizado por um técnico da área e teve como resultado:

- Total incubado: 39 ovos.

- Inférteis: 7 ovos.
- Mortes: 4 ovos.

Com relação as mortes, obtive as seguintes causas:

- 2 ovos - (até 3 dias) - Causas naturais.
- 2 ovos - (entre 10 - 13 dias) - Malformação.

A partir dos resultados obtidos, calcula-se a taxa de eclodibilidade da incubadora, seguindo as duas equações anteriormente apresentadas:

- Pela equação 1 - Eclodibilidade: 71,79%.
- Pela equação 2 - Eclodibilidade: 87,5%.

Para uma avaliação mais criteriosa, opta-se por seguir as recomendações da EMBRAPA que segundo ROSA [23], são três os principais critérios, o primeiro a eclosão que é a relação entre o total de nascimentos e o total incubado, equação 3, sendo a representação do desempenho da granja produtora e da incubadora em conjunto.

$$\text{Eclosão} = \frac{\text{N}^\circ \text{Pintos Nascidos}}{\text{N}^\circ \text{ovos incubados (Total)}} \times 100 \quad (3)$$

A eclodibilidade é avaliação específica da incubadora, sendo definida pela relação entre, o número de nascimentos pelo total de ovos férteis, equação 4.

$$\text{Eclodibilidade} = \frac{\text{N}^\circ \text{Pintos Nascidos}}{\text{N}^\circ \text{ovos incubados (Ferteis)}} \times 100 \quad (4)$$

A fertilidade, é calculada como o número total de ovos férteis pelo número total dos incubados, equação (5), indicando a fecundidade do lote utilizado.

$$\text{Fertilidade} = \frac{\text{N}^\circ \text{ovos incubados Ferteis}}{\text{N}^\circ \text{Total de ovos incubados}} \times 100 \quad (5)$$

Assim os valores percentuais de referência para o processo de incubação industrial sugeridos pela EMBRAPA são de  $\pm 92\%$  para a eclodibilidade,  $\pm 86\%$  de eclosão e  $\pm 96\%$  [24].

A comparação dos valores de referência com os utilizados no processo de incubação são apresentados na tabela 1.

TABELA 1: Comparação dos valores do processo pelas devidas referências

	Referência*	Processo
<b>Eclodibilidade</b>	$\pm 92\%$	87,50%
<b>Eclosão</b>	$\pm 86\%$	71,79%
<b>Fertilidade</b>	$\pm 96\%$	82,05%

\* Fonte: ROSA, 2021.

Vale lembrar que tais parâmetros são para o processo industrial que segue altíssimos padrões de controle e qualidade, o que não condiz com a realidade dos pequenos e médios produtores. Tendo em vista que os ovos empregados neste trabalho foram fornecidos por um pequeno produtor, visando adotar as condições usuais dessa categoria, o mesmo garantiu a fertilidade de todos os ovos. Os resultados mostram que tal informação não condiz com a realidade, desta forma o método de controle de qualidade empregado não possui uma boa assertividade.

No entanto, evidencia que um aumento no índice de fertilidade poderia resultar em uma maior taxa de eclodibilidade, levando em consideração que tanto o controle de temperatura quanto os demais processos obtiveram êxito em seus respectivos propósitos, tal afirmação é reforçada pelos resultados do embriodiagnóstico, os quais apontam que as causas das mortes dos embriões não estão relacionadas ao desempenho do equipamento, o que ocasionou na taxa de eclodibilidade não tão distante da ideal.

O que indica, a intrínseca relação entre a capacidade da incubadora em garantir um percentual de eclodibilidade elevado e a qualidade do processo como um todo, que vai desde a postura, armazenamento e seleção dos ovos para incubação. Em outras palavras, um controle e manuseio mais eficazes tendem a resultar em índices mais altos.

#### IV. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de uma incubadora de baixo custo, que é capaz de automatizar as principais tarefas relacionadas ao processo de incubação de ovos. Essa se mostrou viável economicamente e possui a capacidade de garantir uma boa taxa de eclodibilidade.

Todos os critérios previamente estabelecidos para o equipamento foram atingidos, os sistemas desenvolvidos seguem as recomendações técnicas, além de serem de fácil montagem e manutenção.

O sistema embarcado é capaz de gerenciar o processo de incubação, controlar todos os demais sistemas de forma autônoma, armazenar os dados em memória local e efetuar as ações para tratar eventuais casualidades que possam ocorrer.

O controlador PI desenvolvido, demonstrou um desempenho satisfatório no controle da temperatura durante a incubação. Em grande parte do tempo, manteve a variação dentro da faixa projetada de  $\pm 0,1$  °C, resistiu bem às perturbações, dado que os desvios do setpoint ficaram dentro de um *range* aceitável.

Estima-se que o custo final desta incubadora esteja em torno de R\$ 700,00. Enquanto outras versões comerciais da mesma categoria variam entre R\$ 400,00 a R\$ 1000,00, com a diferentes capacidades em quantidade de ovos para incubação e uso tecnologia. Grande parte delas exigem que o usuário realize o ajuste manual da temperatura e umidade, sem oferecer qualquer sistema de alerta. A desenvolvida neste trabalho, integra todas essas funcionalidades ausentes nas demais, inclusive nas de custos mais altos. E também apresenta capacidade

superior em relação aos modelos mais simples, tornando-se uma alternativa bastante atrativa em relação a automação, capacidade e preço final.

Para trabalhos futuros, é necessário realizar mais incubações, pelo menos mais três vezes para se ter repetibilidade. Dessa forma, será possível analisar e garantir as taxas de eclodibilidade para ovos de galinha e as demais aves que o sistema se propõe a incubar, a fim de realizar os devidos ajustes necessários.

Outro ponto possível de melhoria adicional ao equipamento seria sua integração com a Internet das Coisas, proporcionando maior comodidade aos avicultores para visualização e monitoramento do processo de forma remota. Essa integração não acarretaria um aumento no valor final do produto, uma vez que o microcontrolador utilizado já possui capacidade para realizar essa integração com a Internet. Além de agregar valor, essa inclusão representaria um diferencial significativo para o produto.

#### REFERÊNCIAS

- [1] ZEN, Sergio de; et al. Evolução da avicultura no Brasil. São Paulo: CEPEA, 2014. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0969140001468869743.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2023.
- [2] AMARAL, V. T. Incubação de ovos férteis e o desenvolvimento embrionário. 2019. 34 f. Monografia (Graduação) – Zootecnia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, 2019.
- [3] CEPEA. AGROMENSAL dezembro/2022 FRANGO. 2022. CEPEA. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0134775001672859426.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2023.
- [4] MORA, Leonardo Alvarado. Processo de incubação artificial de ovos: Desenvolvimento de sistemas de medição de temperatura e massa. 2008. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de engenharia agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- [5] MESQUITA, MARIA ALVES. Fatores que afetam o desenvolvimento de embriões de frangos de corte durante a incubação. 2011. Seminário (Mestrado) – Pós-graduação em ciência animal, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.
- [6] EMBRAPA. Considerações técnicas sobre a incubação de ovos de galinhas. 2019. Teresina, PI: Embrapa Meio-Norte. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/207549/1/Do-c-261-AINFO-04-12-2019-2-2.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2023.
- [7] NORTH, Mack O. Commercial Chicken production manual. California: The AVI Publishing Company, 1972. 645 p.
- [8] KINCONY. KC868-A6 HARDWARE DESING DETAILS. 2022. Disponível em: <https://www.kincony.com/kc868-a6-hardware-design-details.html>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- [9] GURU, Bhag S.; HIZIROGLU, Huseyin R. Electric machinery and transformers. 2001. 3.ed. Oxford, New York: Oxford University Press Inc. 2001. 720 p.
- [10] AGELETRÔNICOS. MOTOR PRATO MICROONDAS GALANZ 220V SM-16E NOVO. 2023. Disponível em: <https://www.ageeletronicos.com.br/motor-prato-microondas-galanz-220v-sm-16e-novo?limit=24>. Acesso em: 11 mai. 2020.
- [11] BARI, AMDADUL M.; HOSSAIN, JULHAS M.; KHAN, MONIRUJJAMAN M. Development of Smart Egg Incubator. 2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference, UEMCON 2021. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021.
- [12] USINAINFO. Sensor de Umidade e Temperatura AM2302 DHT22 -40 a 80°C. 2023. Disponível em: [https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-umidade-arduino/sensor-de-umidade-e-temperatura-am2302-dht22-40-a-80c-2813.html?search\\_query=sensor+de+temperatura+e+umidade&results=62](https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-umidade-arduino/sensor-de-umidade-e-temperatura-am2302-dht22-40-a-80c-2813.html?search_query=sensor+de+temperatura+e+umidade&results=62). Acesso em: 11 mai. 2023.
- [13] ANALOG DEVICES. DS1307: Real Time Clock. Norwood, MA: Analog Devices, 2008. Disponível em:

- <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS1307.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2023.
- [14] BOLTON, W. Programmable Logic Controllers, Sexta Edição. EUA: Elsevier Ltd, 2015.
- [15] Arduino Playground. Arduino PID Library. Disponível em: <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- [16] Tillaart, Rob. PCF8574: Arduino library for PCF8574 - I2C IO expander. Disponível em: <https://github.com/RobTillaart/PCF8574>. Acesso em: 10 jul. 2023.
- [17] Rodan, Ali. DS1307ESP: A fully convolutional architecture for basecalling nanopore RNA sequencing data. Disponível em: <https://github.com/rodan/ds1307esp>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- [18] Arduino. Wire: comunicação com dispositivos usando o barramento Serial Peripheral Interface (SPI). Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Wire>. Acesso em: 26 jul. 2023.
- [19] Arduino. EEPROM: leitura e escrita de bytes na memória EEPROM. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Reference/EEPROM>. Acesso em: 7 ago. 2023.
- [20] Rodan, Ali. DS1307ESP: A fully convolutional architecture for basecalling nanopore RNA sequencing data. Disponível em: <https://github.com/rodan/ds1307esp>. Acesso em: 26 jul. 2023.
- [21] CHOREN, Ricardo. Uma abordagem para a modelagem e desenvolvimento de sistemas multiagentes abertos e adaptativos. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://www.cos.ufrj.br/uploadfile/1379623434.pdf>. Acesso em: 2 set. 2023.
- [22] NUNES, Luana da Silva. Controle PID de temperatura com integração de dados em rede. 2018. Santa Catarina: Instituto Federal de Educação, ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2018. Disponível em: [https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/323/TCC\\_Luana\\_Nunes\\_da\\_Silva\\_2018.2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/323/TCC_Luana_Nunes_da_Silva_2018.2.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 2 set. 2023.
- [23] ROSA, Paulo Sérgio. Variáveis relacionadas ao rendimento da incubação de ovos em matrizes de frangos de corte. Embrapa Suínos e Aves. Agência de Informação Tecnológica. 2000. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/439552/variaveis-relacionadas-ao-rendimento-da-incubacao-de-ovos-em-matrizes-de-frangos-de-corte>. Acesso em: 19 dez. 2023.
- [24] ROSA, Paulo Sérgio. Incubação. Embrapa. Agência de Informação Tecnológica. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/criacoes/frango-de-corte/pre-producao/incubatorio/incubacao#:~:text=Sugere-se%20respectivamente%20percentuais%20de%20C2%B1%2086%25%20C2%B1%2092%25,c%3A%20desses%20C3%A9ndices%20utilizam-se%20as%20f%3B3rmulas%20a%20seguir>. Acesso em: 20 nov. 2023.