

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

Curso de Engenharia de Computação

Desenvolvimento de uma Chocadeira Multiespécies Automatizada com Controle PID e Interface Integrada

Guilherme de Araujo Brandão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Computação da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel.

Orientadora: Profa. Liana D. Duenha Garanhani

Campo Grande – MS

2025

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma chocadeira automatizada multiespécies, projetada para atender tanto aves quanto répteis, com controle preciso de temperatura e umidade. O sistema é baseado no microcontrolador ESP32 e integra sensores digitais, um mecanismo de viragem automática dos ovos e um algoritmo de controle PID que mantém a temperatura em faixas ideais para diferentes espécies. A chocadeira permite operação totalmente automática, ajustando os parâmetros de incubação de acordo com cada espécie, e também oferece um modo manual para que o usuário possa realizar ajustes específicos quando necessário. O projeto foi concebido para otimizar o desenvolvimento embrionário e reduzir as perdas causadas por variações de umidade e temperatura, problemas comuns em modelos semiautomáticos ou comerciais de baixo custo. Dessa forma, o trabalho combina automação, flexibilidade e precisão, oferecendo uma solução acessível e adaptável para a produção avícola diversificada e para pesquisas científicas em incubação artificial.

Palavras-chave: incubação artificial; PID; ESP32; automação embarcada; controle térmico.

Abstract

This work presents the development of a multi-species automated incubator capable of accommodating both birds and reptiles, with precise control of temperature and humidity. The system is based on the ESP32 microcontroller and integrates digital sensors, an automatic egg-turning mechanism, and a PID control algorithm to maintain temperature within optimal ranges for different species. The incubator supports fully automated operation, adjusts incubation parameters for each species, and provides a manual mode for users to make specific adjustments when necessary. The design aims to optimize embryonic development and reduce losses caused by humidity and temperature fluctuations, which are common in semi-automatic or low-cost commercial models. By combining automation, flexibility, and precision, this work offers an accessible and adaptable solution for diversified poultry production and scientific research in artificial incubation.

Keywords: automatic incubator; PID control; embedded systems; temperature regulation.

Sumário

Abstract	ii
1 Introdução	1
1.1 Justificativa	1
1.2 Objetivo geral	2
1.3 Organização do Texto	3
2 Referencial Teórico	4
2.1 Fundamentos da incubação artificial	4
2.2 Controle	5
2.2.1 Controle ON-OFF	5
2.2.1.1 Controle ON-OFF com histerese	6
2.2.1.2 Controle PID	7
2.3 Modulação por Largura de Pulso (PWM)	8
2.4 Controle térmico em sistemas embarcados	9
3 Materiais e Métodos	10
3.1 Microcontrolador ESP32	10
3.2 Sensores	11
3.2.1 Módulo sensor DHT22	11
3.3 Atuadores	12
3.3.1 Relés de Estado Sólido	12
3.3.2 Nebulizador	13
3.3.3 Circuito de Controle Analógico (TIP41 + Potenciômetro)	14
3.3.4 Motor DC com Redução	15
3.4 MOSFET	16
3.4.1 Placa de Aquecimento 12 V MK2B	17
3.4.2 Cooler Axial 60x60x20 mm 12 V DC	18
3.5 Interface	19
3.5.1 Teclado Matricial 4x4	19
3.5.2 Display TFT 1.8" (<i>driver</i> ST7735)	20

3.5.3	<i>Encoder</i> Rotativo KY-040	21
3.6	Sistema de Alimentação	22
3.6.1	Fonte de 12 V	22
3.6.2	Conversor DC–DC de 5 V	22
3.6.3	Organização das tensões	23
3.7	Controle de temperatura	23
3.8	Determinação dos Parâmetros do Controlador PID	23
3.8.1	Procedimento Experimental	24
3.8.2	Aplicação do Método de Ziegler–Nichols (Reação ao Degrau)	24
3.9	Controle de Umidade	26
3.10	Controle de rotação dos ovos	27
3.10.1	Sistema de rolagem dos ovos	27
3.10.1.1	Arquitetura mecânica do sistema	28
3.10.2	Motorização e acionamento elétrico	28
3.10.3	Regulação de velocidade do motor	28
3.10.4	Integração com o controle da chocadeira	29
3.11	Estrutura de Software	29
3.11.1	Aquisição de Dados	29
3.11.2	Controle de Temperatura e Segurança Térmica	30
3.11.3	Controle de Umidade e Rotação	31
3.11.4	Gestão das Espécies	33
3.11.5	Interface com o Usuário	34
3.11.6	Rotinas de Incubação e Eclosão	34
3.11.7	Persistência de Estado (NVS)	35
3.12	Fluxo de operação	36
4	Resultados e Discussão	38
4.1	Resultados do Controle PID	38
4.1.1	Estabilidade de Temperatura	39
4.1.2	Eficiência Energética e Estabilidade	40
4.1.3	Conclusão Parcial	41
4.1.4	Estabilidade de Umidade	41
4.1.5	Interface de operação	42
4.1.6	Estimativa de custo de produção e escalabilidade da solução	42
4.1.6.1	Custo de produção do protótipo	43
4.1.6.2	Estimativas para ampliação e aumento da capacidade	44
4.1.7	Limitações e observações	44
5	Conclusão	46

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de comportamento de um sistema de controle ON/OFF simples.	6
2.2	Exemplo de comportamento de um sistema de controle ON-OFF com histerese.	7
2.3	Exemplo de comportamento de um sistema de controle PID.	8
3.1	Diagrama da arquitetura geral do sistema.	10
3.2	Pinagem módulo ESP32.	11
3.3	Sensor de temperatura e umidade DHT22.	12
3.4	Módulo Relé.	13
3.5	Nebulizador.	14
3.6	Componente TIP41.	15
3.7	Componente potenciômetro.	15
3.8	Motor DC utilizado no mecanismo de rolagem.	16
3.9	MOSFET.	17
3.10	Placa de aquecimento MK2B utilizada no sistema.	18
3.11	Cooler Axial.	19
3.12	Teclado Matricial 4x4.	20
3.13	<i>Display</i> TFT 1.8" (<i>driver</i> ST7735).	20
3.14	<i>Encoder</i> Rotativo KY-040.	21
3.15	Resposta térmica da planta ao degrau de potência máxima.	24
3.16	Determinação gráfica de L , T e do ponto de máxima inclinação pelo método de Ziegler–Nichols.	26
3.17	Modelo tridimensional do sistema de rolagem desenvolvido para a chocadeira.	27
3.18	Driver de motor DC com transistor NPN	29
3.19	Fluxograma do fluxo de operação do sistema.	37
4.1	Comportamento da temperatura ao longo de 4.800 segundos, mostrando a atuação do PID em tempo real.	39
4.2	Comportamento da temperatura em médias por minuto, evidenciando a estabilidade fornecida pelo controle PID.	40
4.3	Comportamento da umidade ao longo de 4.800 segundos, mostrando o controle por histerese em tempo real.	41

4.4	Comportamento da unidade em médias por minuto, evidenciando alta estabilidade do sistema.	42
-----	---	----

Lista de Códigos-Fonte

1	Inicialização do sensor DHT22.	29
2	Aquisição de temperatura e umidade.	30
3	Configuração do controlador PID de temperatura.	30
4	Controle de temperatura com PID.	31
5	Rotina de segurança térmica.	31
6	Controle de umidade com histerese.	32
7	Rotina de rotação automática dos ovos.	32
8	Estrutura e vetor de espécies.	33
9	Atualização das informações no <i>display</i>	34
10	Rotina principal de incubação.	34
11	Rotina principal de eclosão.	35

Capítulo 1

Introdução

A incubação artificial é uma tecnologia consolidada tanto na produção avícola industrial quanto em programas de conservação de espécies. Seu princípio é recriar, em ambiente controlado, as condições ideais de temperatura, umidade e movimentação dos ovos, replicando o comportamento das aves ou dos répteis, para permitir o desenvolvimento embrionário adequado [1].

Contudo, grande parte das chocadeiras disponíveis comercialmente é projetada para um único tipo de espécie, o que dificulta o uso em criações diversificadas ou pesquisas que envolvem múltiplas espécies. Além disso, muitas dessas soluções no mercado apresentam baixa precisão de controle, sobretudo no que concerne à umidade, e capacidade limitada de personalização.

Com o avanço dos microcontroladores e sensores digitais, torna-se viável implementar chocadeiras de baixo custo com desempenho comparável a sistemas robustos, a fim de democratizar o acesso, seja para o desenvolvimento avícola, seja para pesquisas. Desse modo, o presente projeto propõe uma solução baseada em ESP32 e controle PID, integrando sensores de temperatura e umidade, atuadores de aquecimento, nebulização e viragem automática e uma interface homem-máquina composta por teclado matricial, *display* TFT e *encoder* rotativo.

1.1 Justificativa

Apesar da ampla disseminação de chocadeiras automáticas, ainda se observa a escassez de modelos acessíveis capazes de atender às necessidades de diferentes espécies de aves e répteis. Diante dessa limitação, muitos usuários optam por modelos semiautomáticos, que implicam reduções na eficiência e na precisão de controle.

Um dos principais problemas está relacionado ao controle de umidade. As chocadeiras convencionais, em geral, utilizam recipientes com água instalados no interior do equipamento para manter a umidade do ambiente. No entanto, esse método não garante

que os ovos recebam a quantidade adequada de umidade necessária ao desenvolvimento embrionário. A umidade exerce influência direta nesse processo, pois a sua falta pode provocar a perda excessiva de água pelos poros do ovo, comprometendo o desenvolvimento do embrião e reduzindo a taxa de eclosão. Por outro lado, o excesso de umidade pode provocar o afogamento do embrião no momento da eclosão [6].

Além disso, o controle de temperatura também se mostra violado, uma vez que, em modelos semiautomáticos, o operador precisa abrir a chocadeira para virar os ovos. Essa prática acarreta trocas térmicas com o ambiente externo, prejudicando a estabilidade térmica interna e, conseqüentemente, o processo de incubação.

Dessa forma, identifica-se uma demanda por sistemas que combinem custo, flexibilidade, precisão e automação no controle das variáveis de temperatura e umidade, de modo a otimizar o processo de incubação artificial.

Do ponto de vista acadêmico, o desenvolvimento de uma chocadeira automatizada representa aplicação prática dos conteúdos de eletrônica, microcontroladores, controle de processos e sistemas embarcados estudados ao longo da graduação de Engenharia de Computação.

Em relação aos aspectos sociais e econômicos, a proposta contribui para democratizar o acesso a tecnologias de incubação de precisão, permitindo que pequenos produtores e centros de pesquisa utilizem equipamentos ajustáveis e reprogramáveis a custos reduzidos [1, 6].

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma chocadeira automatizada multiespécie, com interface de operação local e parâmetros configuráveis para diferentes espécies. Para que o objetivo central seja atingido, os seguintes objetivos específicos são definidos:

- Implementar o controle de temperatura;
- Projetar um sistema de controle de umidade por histerese;
- Integrar teclado matricial, *display* e *encoder* para ajuste de parâmetros;
- Desenvolver estrutura de dados para armazenar perfis de espécies e alternar automaticamente entre fases de incubação e eclosão;
- Avaliar o desempenho térmico do sistema e propor melhorias na continuidade e na confiabilidade.

A solução desenvolvida utilizou um algoritmo PID baseado na biblioteca `PID_v1.h` para controle de temperatura, um sensor DHT22 para controle de umidade por histerese,

um *display* TFT 1.8" e um *encoder* KY-040. As escolhas que resultaram no uso destes dispositivos e bibliotecas serão justificadas na metodologia.

1.3 Organização do Texto

Este texto está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta os fundamentos da incubação artificial e o referencial teórico dos sistemas de controle utilizados no trabalho; o Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos para o desenvolvimento da solução; o Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões; por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Referencial Teórico

O objetivo deste capítulo é apresentar os principais parâmetros e conceitos relativos à incubação artificial, bem como a fundamentação teórica dos sistemas de controle empregados no projeto.

2.1 Fundamentos da incubação artificial

De acordo com Agrodok [1], a incubação artificial tem por objetivo substituir a ave no processo de choco, fornecendo condições adequadas de temperatura, umidade e ventilação para o desenvolvimento embrionário. Para ovos de galinha, a temperatura ideal situa-se em torno de $37,5^{\circ}\text{C}$, enquanto a umidade relativa deve ser mantida entre 55% e 65% durante a maior parte do período de incubação, sendo elevada para aproximadamente 75% na fase final, favorecendo a eclosão.

A uniformidade térmica na incubadora é tão importante quanto a manutenção da temperatura nominal. Menezes et al. [2] destacam que pequenas variações de temperatura dentro da câmara podem influenciar diretamente o desenvolvimento embrionário e a taxa de eclosão, reforçando a necessidade de um controle térmico preciso ao longo de todo o processo. Além disso, a viragem periódica dos ovos, recomendada a cada duas horas, evita que o embrião se adira às membranas internas, contribuindo para uma maior taxa de sucesso no desenvolvimento embrionário.

O manejo adequado da temperatura e da umidade também influencia diretamente a perda de massa dos ovos, parâmetro crítico para o desenvolvimento embrionário. O *Guia de Incubação Cobb 500* [7] recomenda que, para frangos de corte, a perda de massa até o 18º dia de incubação seja de aproximadamente 12%, evidenciando a importância do equilíbrio entre temperatura e umidade ao longo de todo o período.

Além de temperatura e umidade, a ventilação adequada é fundamental para garantir trocas gasosas eficientes e evitar o acúmulo de dióxido de carbono (CO_2) na incubadora. A concentração excessiva de CO_2 pode causar atrasos no desenvolvimento embrionário e

aumentar a mortalidade embrionária. Segundo Deeming [3], a ventilação deve assegurar fornecimento suficiente de oxigênio e a remoção de gases metabólicos, mantendo a uniformidade da temperatura e da umidade, sem gerar correntes de ar que possam resfriar os ovos.

Entretanto, a incubação artificial não se restringe à manutenção da temperatura e da umidade no interior do equipamento, mas envolve o gerenciamento integrado de variáveis ambientais e biológicas essenciais para a eficiência da eclosão, incluindo ventilação, viragem periódica dos ovos e monitoramento da perda de massa. O sucesso desse processo resulta na produção de *sauropsídeos*¹ uniformes e saudáveis, contribuindo tanto para a produtividade da avicultura comercial quanto para a eficácia de programas de conservação de espécies.

2.2 Controle

O controle é uma área fundamental da engenharia que tem como objetivo regular o comportamento de sistemas dinâmicos, garantindo que determinadas variáveis permaneçam dentro de limites desejados mesmo diante de perturbações externas. Em sistemas embarcados, o controle automático é responsável por ajustar continuamente as variáveis de interesse, como temperatura, umidade e velocidade, de modo que atendam a uma referência.

Existem diferentes estratégias de controle, que variam de métodos simples, baseados em liga/desliga, a técnicas mais sofisticadas, como o controle PID e o controle preditivo. A escolha do método depende das características do sistema, do grau de precisão exigido e da natureza da variável controlada.

2.2.1 Controle ON-OFF

O controle *ON-OFF* (ou *liga-desliga*) é o tipo mais simples de estratégia de controle automático. Segundo Ogata [8], trata-se de um controlador não linear cuja saída assume apenas dois estados: ligado (*ON*) ou desligado (*OFF*). Essa característica faz com que o atuador opere de forma totalmente binária, sem valores intermediários de acionamento.

No controle *ON-OFF* simples, o sistema liga o atuador sempre que a variável controlada estiver abaixo do ponto de referência (*setpoint*) e o desliga assim que esse valor for ultrapassado. Por exemplo, em um sistema de aquecimento, o aquecedor é ligado quando a temperatura medida é inferior à temperatura desejada e desligado quando a temperatura excede o limite de ajuste.

Embora seja de fácil implementação e de baixo custo, o controle *ON-OFF* apresenta desvantagens, tanto no uso quanto no controle acertivo da variável. Como o sinal de

¹Sauropsídeos são um grupo de vertebrados que inclui aves e répteis, caracterizados por adaptações ao ambiente terrestre, como pele escamosa ou penas, e reprodução ovípara ou ovovivípara.

controle alterna constantemente entre os estados ligado e desligado, a variável controlada oscila em torno do valor de referência, sem atingir um regime estacionário preciso. Esse comportamento pode causar oscilações contínuas, resultando em desgaste mecânico e elétrico, o que pode acarretar defeitos de uso e reduzir sua vida útil.

Assim, o controle *ON-OFF* simples é adequado apenas para processos lentos e tolerantes a variações, em que pequenas oscilações na variável de saída não comprometem o desempenho geral do sistema.

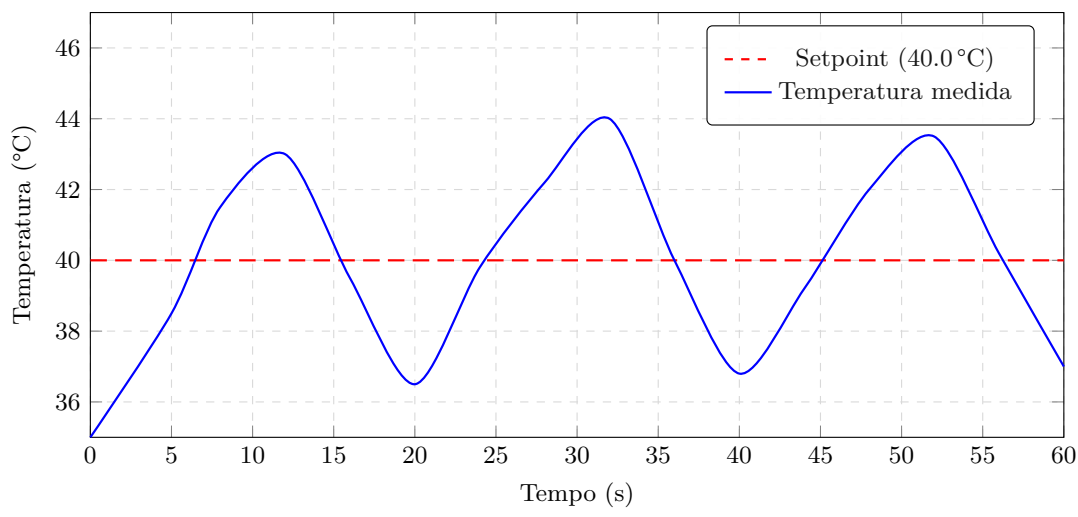


Figura 2.1 – Exemplo de comportamento de um sistema de controle ON/OFF simples.

2.2.1.1 Controle ON-OFF com histerese

Para mitigar o desgaste e reduzir o número de comutações do atuador, é comum empregar o controle *ON-OFF* com histerese, também conhecido como *controle diferencial*. Conforme Ogata [8], essa técnica introduz uma faixa de tolerância entre os estados de ligar e desligar, de modo que o controlador só muda de estado quando a variável controlada ultrapassa os limites superiores ou inferiores definidos.

Em um sistema térmico, por exemplo, o atuador é acionado quando a temperatura cai abaixo de um limite inferior e desligado quando ultrapassa o limite superior. Essa diferença entre os dois limiares é denominada banda de histerese. O uso dessa banda impede que o controlador opere de forma excessivamente sensível, evitando o chaveamento constante.

Esse tipo de controle melhora a estabilidade e reduz o desgaste dos componentes, mantendo a variável controlada em uma faixa aceitável. Entretanto, ainda não oferece controle contínuo, sendo mais apropriado para aplicações simples em que oscilações moderadas são toleradas.

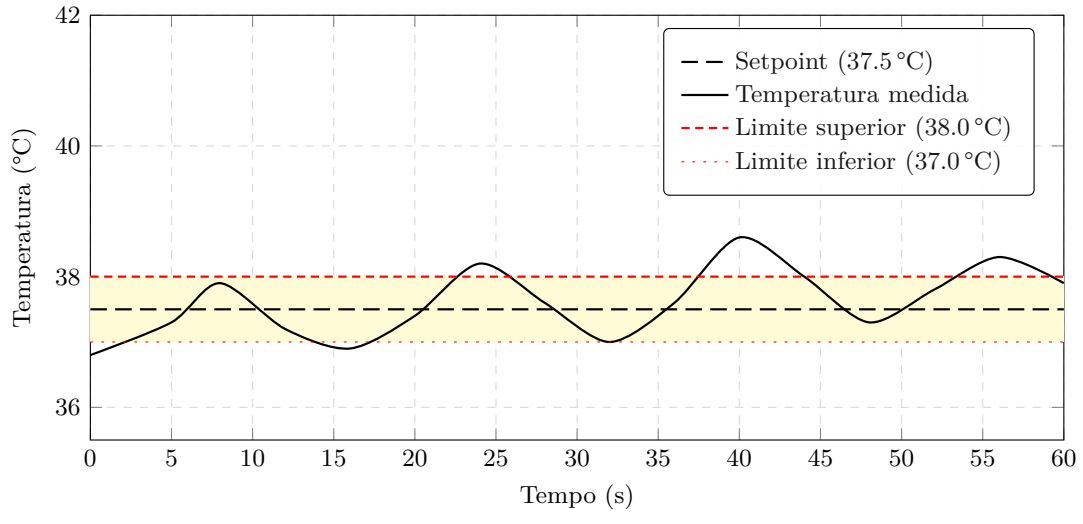


Figura 2.2 – Exemplo de comportamento de um sistema de controle ON-OFF com histerese.

2.2.1.2 Controle PID

O controle PID (do inglês, *Proportional-Integral-Derivativo*) é amplamente utilizado para compensar perturbações externas e minimizar o erro em *regime permanente*².

Segundo Ogata [8], a ação proporcional atua sobre o erro instantâneo, a integral elimina o erro estacionário e a derivativa antecipa variações, permitindo, dessa forma, respostas mais rápidas e estáveis. Nesse contexto, é fundamental controlar o *overshoot*³, pois valores elevados podem comprometer a viabilidade embrionária nos estágios iniciais, considerando um tempo de acomodação satisfatório para o controle térmico, que, por natureza, é lento.

Para lidar com as limitações físicas do sistema, técnicas de *anti-windup* são aplicadas, evitando que a ação integral se acumule excessivamente e cause grandes *overshoots* quando o atuador estiver saturado. Dessa forma, o controlador PID processa o erro entre o valor de referência e a saída medida, ajustando o sinal de controle enviado aos atuadores para garantir a estabilidade e a precisão do sistema térmico.

²Regime permanente é o estado em que a saída do sistema se aproxima de um valor constante em resposta a uma referência constante, após a dissipação dos efeitos transitórios iniciais.

³O *overshoot* é o excesso temporário da variável de saída acima do valor desejado

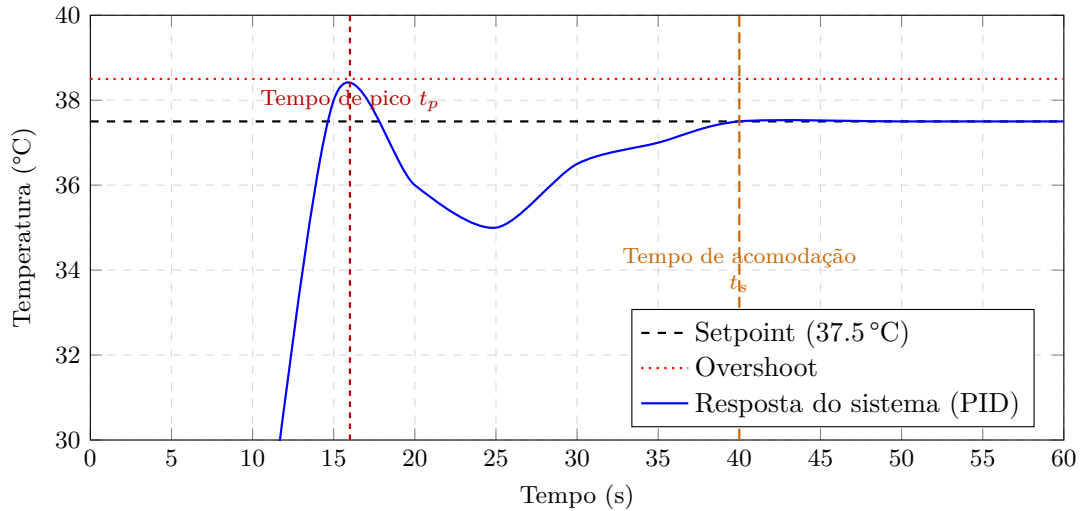


Figura 2.3 – Exemplo de comportamento de um sistema de controle PID.

2.3 Modulação por Largura de Pulso (PWM)

A Modulação por Largura de Pulso (PWM do inglês, *Pulse Width Modulation*) é uma técnica de controle de potência baseada na comutação rápida do sinal, permitindo ajustar a potência média entregue à carga sem dissipação significativa em forma de calor, diferentemente de métodos lineares. Esta técnica é amplamente empregada em eletrônica de potência e em sistemas embarcados para controle de atuadores, permitindo regular a potência média entregue a cargas elétricas sem recorrer à dissipação linear. O princípio consiste em aplicar ao dispositivo uma forma de onda digital periódica, alternando rapidamente entre níveis alto e baixo, enquanto o valor efetivo percebido pela carga é determinado pelo *duty cycle* a razão entre o tempo em nível alto e o período total do sinal.

Em sistemas embarcados, o PWM é utilizado para controle de motores DC, aquecimento resistivo, LEDs, drivers de potência e diversas outras cargas que podem ser acionadas por comutação rápida. A principal vantagem da técnica é a elevada eficiência, uma vez que o dispositivo de comutação (transistor ou MOSFET)⁴ opera predominantemente em estados de saturação ou corte, reduzindo perdas por dissipação térmica quando comparado a reguladores lineares.

O microcontrolador ESP32 utilizado neste projeto disponibiliza temporizadores dedicados e canais PWM de alta resolução, o que permite ajustar a potência aplicada aos atuadores de forma contínua e precisa. Além disso, a resposta dinâmica proporcionada pelo PWM o torna adequado para sistemas de controle, como no acionamento de elementos térmicos regulados por controladores PID ou na limitação de velocidade de motores

⁴O MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) é um transistor controlado por tensão, amplamente utilizado no acionamento de cargas devido à sua baixa resistência de condução e alta velocidade de chaveamento, conforme apresentado por Sedra e Smith [10].

elétricos.

Segundo Sedra e Smith [10], o uso de PWM em conjunto com transistores de comutação constitui uma das estratégias mais eficientes para o controle de potência em circuitos modernos, especialmente em sistemas de automação e de eletrônica embarcada.

2.4 Controle térmico em sistemas embarcados

A temperatura é uma variável fundamental em sistemas térmicos e caracteriza-se por possuir um tempo de resposta lento e comportamento aproximadamente linear. Existem diversas estratégias para o seu controle, porém a mais eficaz é a utilização do controlador PID, uma vez que essa variável não deve ser excessivamente sensível a variações em determinados contextos. A regulação térmica em incubadoras artificiais pode ser modelada como um *sistema dinâmico de primeira ordem*⁵ com atraso de transporte.

De acordo com Ogata [8], os servomecanismos são dispositivos projetados para ajustar a saída de um sistema de forma que ela siga uma referência desejada. Seu princípio fundamental baseia-se no uso de realimentação negativa, na qual a saída é continuamente medida, comparada ao sinal de referência e utilizada para gerar ações corretivas no atuador, garantindo que a variável controlada acompanhe com precisão o valor desejado. Nesse contexto, a referência $r(t)$ representa o valor alvo do sistema, enquanto os sensores fornecem as medições necessárias para o processo de controle.

Ainda conforme o autor, sistemas com elevada inércia apresentam resposta lenta às variações da entrada, devido à sua massa, capacidade térmica ou outras características físicas que retardam a dinâmica da variável controlada [8]. Em incubadoras, essa característica é especialmente relevante na planta térmica. Além disso, os atuadores podem operar sob saturação, isto é, atingir seus limites físicos de atuação. O sensor DHT22, por sua vez, disponibiliza leituras simultâneas de temperatura e umidade com precisão adequada para aplicações não industriais ($\pm 0,5^\circ\text{C}$ e $\pm 2\%$ UR), permitindo a implementação eficaz do sistema de controle em um ambiente embarcado.

Dessa forma, a integração de sensores e atuadores controlados permite que a incubadora mantenha condições ambientais estáveis, garantindo maior taxa de eclosão e maior segurança embrionária.

⁵Um sistema dinâmico de primeira ordem é aquele cuja resposta a uma entrada pode ser descrita por uma equação diferencial de primeira ordem, possuindo uma única constante de tempo que define a velocidade de resposta do sistema, conforme explicado por Ogata [8].

Capítulo 3

Materiais e Métodos

O sistema foi projetado em torno do microcontrolador **ESP32**, escolhido por sua capacidade de processamento e múltiplos pinos de entrada e saída digitais. Ele coordena o funcionamento de sensores, atuadores e a interface de operação. A Figura 3.1 ilustra a arquitetura geral do sistema.

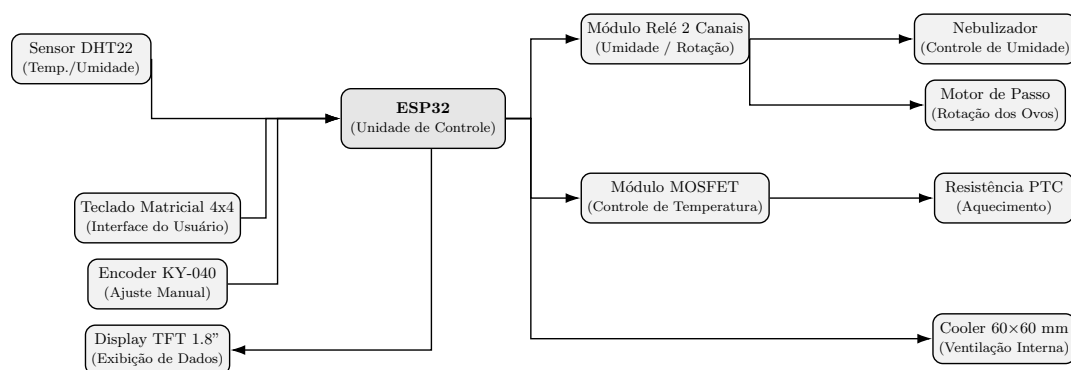


Figura 3.1 – Diagrama da arquitetura geral do sistema.

As seções seguintes descrevem os principais componentes do sistema.

3.1 Microcontrolador ESP32

O **ESP32** é o microcontrolador responsável pelo controle central de todo o sistema. Ele interliga e coordena o funcionamento de todos os módulos, processando os sinais de entrada e gerando as saídas de controle. É o núcleo do sistema de automação, executando rotinas de controle PID de temperatura, de umidade e de rotação dos ovos.

A pinagem do módulo ESP32 é ilustrada na Figura 3.9 e as especificações técnicas do microcontrolador são as seguintes:

- Tensão de operação: 3,0–3,6 V (típico: 3,3 V)
- Corrente máxima em transmissão Wi-Fi: até 500 mA

- Núcleos de CPU: 2 (dual-core Xtensa LX6)
- Frequência de clock: até 240 MHz
- Memória SRAM: 520 KB
- Memória Flash: até 16 MB
- Interfaces: UART, SPI, I²C, PWM, ADC, DAC, GPIOs
- Temperatura de operação: -40°C a +85°C

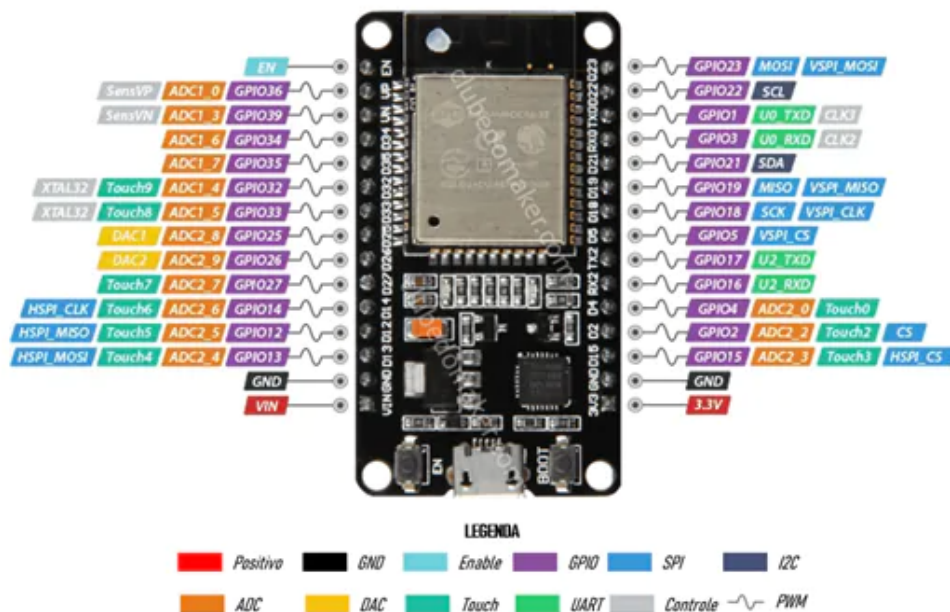


Figura 3.2 – Pinagem módulo ESP32.

3.2 Sensores

3.2.1 Módulo sensor DHT22

O **DHT22** é o sensor responsável pela medição da temperatura e da umidade relativa do ar no interior da chocadeira. Ele envia sinais digitais ao ESP32, que interpreta esses valores e os utiliza para controlar o aquecimento e a umidificação do ambiente, mantendo as condições ideais para o desenvolvimento dos ovos.

Especificações técnicas:

- Faixa de temperatura: -40°C a +80°C
- Precisão da temperatura: $\pm 0,5^\circ\text{C}$
- Faixa de umidade: 0–100% UR

- Precisão da umidade: $\pm 2-5\%$
- Tempo de amostragem: 2 s (máx.)
- Tensão de alimentação: 3,3–6 V

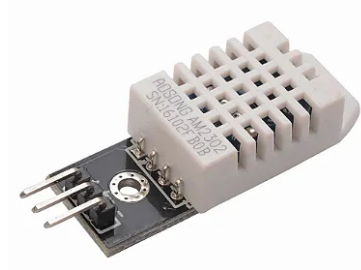


Figura 3.3 – Sensor de temperatura e umidade DHT22.

3.3 Atuadores

Os atuadores são responsáveis pela ação física do sistema, de acordo com os sinais de controle gerados pelo microcontrolador.

3.3.1 Relés de Estado Sólido

O **módulo relé de dois canais** é empregado para acionar dispositivos de potência sob comando do ESP32. Um dos canais é utilizado para o controle de umidade (acionando o nebulizador), enquanto o outro é responsável pelo controle de rotação dos ovos, ligando e desligando o motor de passo em horários programados.

Especificações técnicas:

- Tensão de acionamento: 5 V DC
- Corrente da bobina: 70-80 mA por canal
- Capacidade de contato: 10 A / 250 V AC ou 10 A / 30 V DC
- Isolamento óptico (dependendo do modelo)
- LED indicador de status

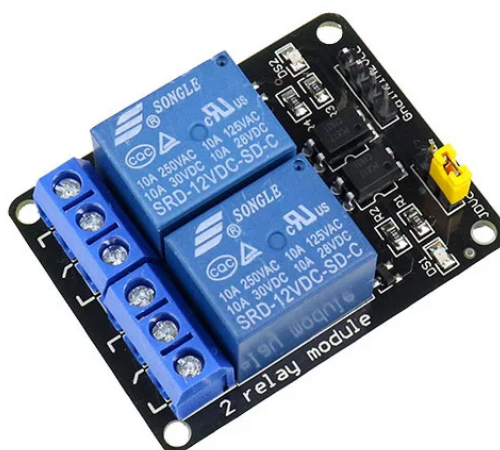


Figura 3.4 – Módulo Relé.

3.3.2 Nebulizador

O **nebulizador ultrassônico** atua como a planta responsável pela geração e pelo controle da umidade no interior da chocadeira. Ele converte a água do reservatório em micropartículas por meio de vibração piezoelétrica, liberando névoa com precisão e eficiência. O sistema conta com um reservatório acoplado, que fornece água ao nebulizador conforme necessário, garantindo um nível de umidade adequado ao estágio de incubação.

Especificações técnicas:

- Tensão de operação: 5 V DC
- Corrente de operação: até 300 mA
- Potência típica: 1.5–2 W
- Frequência de oscilação: cerca de 108 KHz
- Saída de névoa: 40–50 mL/h



Figura 3.5 – Nebulizador.

3.3.3 Circuito de Controle Analógico (TIP41 + Potenciômetro)

O circuito de controle de velocidade é composto por um transistor bipolar de potência TIP41 em conjunto com um potenciômetro de 5,1 k Ω . Esse arranjo funciona como um estágio analógico em modo linear, no qual a velocidade do motor é ajustada por meio da variação da polarização de base do transistor. Dessa forma, é possível limitar a rotação do atuador de forma contínua, garantindo movimentação suave dos roletes sem necessidade de modulação PWM digital.

Especificações técnicas do TIP41:

- Tipo: NPN (transistor de potência)
- Tensão máxima V_{CEO} : 100 V
- Corrente máxima I_C : 6 A
- Ganho típico (h_{FE}): 15-75
- Dissipação máxima: 65 W
- Encapsulamento: TO-220

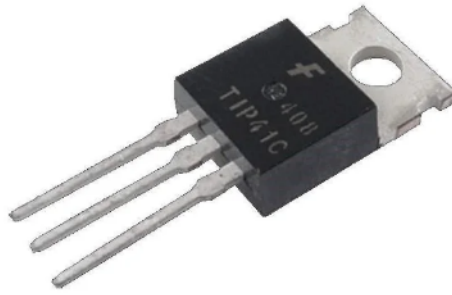


Figura 3.6 – Componente TIP41.

Especificações do potenciômetro:

- Resistência nominal: 5,1 k Ω
- Tipo: linear (3 terminais)
- Função: ajuste da polarização de base e limitação da corrente do motor



Figura 3.7 – Componente potenciômetro.

3.3.4 Motor DC com Redução

O atuador responsável pela rolagem dos ovos é um **motor DC com redução** (DC gear motor), capaz de fornecer alto torque em baixa velocidade, característica essencial para o acionamento da rosca sem-fim e dos roletes do mecanismo de rolagem. Esse tipo de motor opera de forma estável sob cargas variáveis e apresenta baixo nível de ruído mecânico, sendo adequado para aplicações contínuas em baixa rotação.

Especificações técnicas do motor:

- Tipo: motor DC com caixa de redução

- Tensão nominal: 12 V DC
- Corrente típica: 200-400 mA
- Rotação nominal: 20-60 rpm (dependente da razão de redução)
- Característica principal: alto torque em baixa velocidade
- Aplicação: acionamento de mecanismos lineares ou rotativos de baixa velocidade

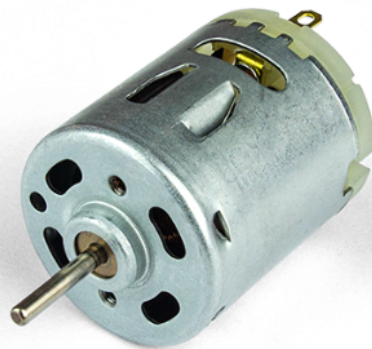


Figura 3.8 – Motor DC utilizado no mecanismo de rolagem.

3.4 MOSFET

O **módulo MOSFET** é utilizado para controlar a resistência de aquecimento do sistema. O ESP32 envia um sinal PWM, proveniente da saída do controle PID, e o MOSFET regula a potência dissipada pela resistência, ajustando a temperatura do ambiente até atingir e manter o valor de referência definido pelo usuário.

Especificações técnicas:

- Tipo: N-channel
- Tensão máxima V_{DS} : 55 V
- Corrente máxima I_D : 49 A
- Resistência $R_{DS(on)}$: 0,032 Ω
- Tensão de porta $V_{GS(th)}$: 2-4 V

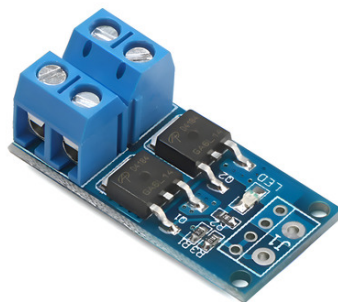


Figura 3.9 – MOSFET.

3.4.1 Placa de Aquecimento 12 V MK2B

A placa de aquecimento do tipo MK2B é o elemento responsável pelo fornecimento de calor à câmara incubadora. O componente é composto por trilhas resistivas em cobre dispostas sobre uma placa de fibra de vidro (FR4), garantindo aquecimento uniforme em toda a sua superfície. Quando alimentada em 12 V, a resistência elétrica de aproximadamente 1,2 resulta em uma potência nominal de cerca de 120 W, valor suficiente para elevar a temperatura interna ao ponto de incubação, sem risco de superaquecimento.

Especificificações técnicas:

- Modelo: MK2B (cama aquecida de impressora 3D)
- Dimensões: 214 mm × 214 mm
- Tensão de operação: 12 V DC
- Corrente nominal: 10 A
- Potência nominal: 120 W
- Material: fibra de vidro FR4 com trilhas de cobre
- Resistência elétrica: $\approx 1,2 \Omega$
- Faixa de temperatura operacional: até 110°C



Figura 3.10 – Placa de aquecimento MK2B utilizada no sistema.

3.4.2 Cooler Axial 60x60x20 mm 12 V DC

O *cooler* axial é responsável pela ventilação interna da chocadeira, promovendo a circulação uniforme do ar para manter a temperatura e a umidade estáveis em todos os pontos do aparelho. Seu funcionamento contínuo garante a homogeneidade térmica essencial para o desenvolvimento dos embriões.

Especificações técnicas:

- Dimensões: 60 x 60 x 20 mm
- Tensão de operação: 12 V DC
- Corrente nominal: 0,15 A
- Tipo de rolamento: *Sleeve Bearing*
- Tipo: *Axial Fan*
- Características: baixo ruído, alta durabilidade e proteção contra sobrecarga (impedância protegida)



Figura 3.11 – Cooler Axial.

3.5 Interface

A interface permite a interação entre o usuário e o sistema, exibindo informações e recebendo comandos.

3.5.1 Teclado Matricial 4x4

O **teclado matricial 4x4** é o principal meio de interação do usuário com o sistema. Por meio dele, o operador pode selecionar a espécie a ser incubada, escolher modos de operação pré-definidos e iniciar ou finalizar o processo de incubação.

Especificações técnicas:

- Configuração: 4 linhas x 4 colunas
- Tensão de operação: 3,3-5 V
- Tipo de chave: membrana ou botão tátil
- Interface: digital (varredura matricial)



Figura 3.12 – Teclado Matricial 4x4.

3.5.2 *Display TFT 1.8" (driver ST7735)*

O *display* TFT de 1.8" é o componente gráfico responsável por exibir as informações visuais do sistema. Ele apresenta os parâmetros de temperatura, umidade, espécie selecionada e opções de menu, permitindo ao usuário acompanhar o processo de incubação de forma clara e intuitiva.

Especificações técnicas:

- Tamanho: 1,8 polegadas
- Resolução: 128 x 160 pixels
- Controlador: ST7735
- Interface: SPI
- Tensão de operação: 3,3 V
- Iluminação: LED branco



Figura 3.13 – *Display* TFT 1.8" (driver ST7735).

3.5.3 *Encoder* Rotativo KY-040

O *encoder* rotativo KY-040 é utilizado como método de entrada manual quando a espécie desejada **não** consta das rotinas pré-definidas. Ao optar por *Modo Manual* pelo teclado matricial, o sistema guia o usuário por uma sequência de parâmetros. Para cada parâmetro:

1. O display exibe o nome do parâmetro e o valor atual.
2. O usuário gira o encoder para ajustar o valor (incrementando ou decrementando).
3. O usuário pressiona o botão integrado do encoder (SW) para confirmar o valor e avançar para o próximo parâmetro.
4. Ao final da sequência, o usuário confirma o início do ciclo pelo botão de *Iniciar* no teclado matricial.

Especificações técnicas:

- Tipo: incremental
- Saídas: CLK, DT e SW (botão)
- Tensão de operação: 3,3-5 V
- Passos por rotação: 20 (típico)
- Interface: digital



Figura 3.14 – *Encoder* Rotativo KY-040.

3.6 Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação fornece as tensões necessárias para o funcionamento do conjunto eletrônico da chocadeira. A arquitetura é composta por um barramento de 12 V e 15 A para os atuadores e por um conversor DC–DC que reduz a tensão para 5 V, utilizada pelos circuitos lógicos.

3.6.1 Fonte de 12 V

A alimentação principal é realizada por uma fonte chaveada de 12 V e 15 A. Ela atende:

- placa de aquecimento MK2B (120 W);
- ventiladores de circulação;
- módulo de umidificação;
- motor de rotação;
- demais cargas em 12 V.

A fonte foi escolhida por apresentar boa estabilidade, operação em ampla faixa de entrada (100–240 V AC) e corrente suficiente para todas as cargas. O modelo utilizado fornece 15 A, valor adequado para o aquecimento e para os demais atuadores.

3.6.2 Conversor DC–DC de 5 V

Os dispositivos lógicos operam em 5 V. Para isso, utiliza-se um conversor DC–DC (buck converter), que reduz a tensão de 12 V para 5 V. Esse conversor alimenta:

- ESP32 DevKit V1;
- display TFT ST7735;
- módulo SD Card;
- teclado matricial e encoder;
- sensores (DHT22);
- circuitos de acionamento dos relés.

A escolha do conversor DC–DC evita aquecimento excessivo, garante estabilidade da linha de 5 V e reduz quedas de tensão que poderiam causar reinicializações do microcontrolador.

3.6.3 Organização das tensões

O sistema de alimentação é dividido em dois barramentos independentes. O barramento de **12 V** supre os elementos de potência (a placa de aquecimento, os ventiladores, o motor e os atuadores), enquanto o barramento de **5 V**, obtido por meio de um conversor DCDC, alimenta o ESP32, os sensores, os módulos de interface e demais circuitos lógicos.

A separação entre barramentos é recomendada em sistemas embarcados para reduzir a condução de ruídos provenientes de cargas de alta corrente e evitar interferência na alimentação dos circuitos digitais. De acordo com Horowitz e Hill [9], linhas de potência sujeitas a variações de carga introduzem ruído no barramento, o que torna necessário isolar a alimentação de lógica para garantir estabilidade e evitar reinicializações inadvertidas do microcontrolador.

Essa organização também facilita a expansão modular, permitindo adicionar novos conversores DC-DC ou redistribuir cargas sem comprometer o barramento lógico.

3.7 Controle de temperatura

Diversas estratégias de controle térmico foram avaliadas para a incubadora. O método ON/OFF, embora simples, gera oscilações amplas em torno do ponto de operação, tornando-o inadequado à precisão exigida na incubação artificial. O controle por histerese reduz o número de comutações e melhora a estabilidade, porém ainda apresenta variações térmicas acima do limite recomendado pela literatura.

Diante dessas limitações, adotou-se o controle PID, que combina ações proporcional, integral e derivativa, permitindo estabilizar a temperatura com precisão superior e manter a temperatura dentro da faixa adequada ao desenvolvimento embrionário. O PID apresentou melhor desempenho entre as alternativas avaliadas, justificando sua utilização como estratégia principal de controle térmico no protótipo.

3.8 Determinação dos Parâmetros do Controlador PID

A sintonia adequada de um controlador PID é essencial para garantir a estabilidade térmica da chocadeira e a rápida convergência para a temperatura de referência. Para este trabalho, adotou-se a metodologia clássica de *Reação ao Degrau* proposta por Ziegler e Nichols [4], amplamente descrita na literatura de controle, como em Ogata [8] e Dorf e Bishop [5]. O método consiste em aplicar um degrau de entrada à planta, registrar a resposta temporal e, a partir da curva resultante, estimar os parâmetros dinâmicos fundamentais para o cálculo de K_p , K_i e K_d .

3.8.1 Procedimento Experimental

O experimento foi conduzido conforme a metodologia descrita por Ogata [8], que recomenda a aplicação de um degrau suficientemente grande para evidenciar a dinâmica térmica do sistema. Assim, o elemento de aquecimento foi operado em sua *potência máxima*, replicando as condições reais de uso na chocadeira, garantindo a fidelidade entre o modelo experimental e o comportamento físico final.

A coleta de dados foi realizada ao longo de aproximadamente seis horas, registrando-se a evolução da temperatura até que a taxa de variação se tornasse mínima, por volta de $0,5^{\circ}\text{C}$ em um intervalo próximo de 80 minutos. Esse comportamento indica que o sistema aproximava-se do regime permanente, condição necessária à aplicação do método de Ziegler-Nichols [4].

Os dados brutos foram posteriormente processados por médias temporais, resultando em uma série reduzida equivalente a aproximadamente 350 minutos de operação. Essa curva consolidada foi utilizada para identificar os parâmetros dinâmicos.

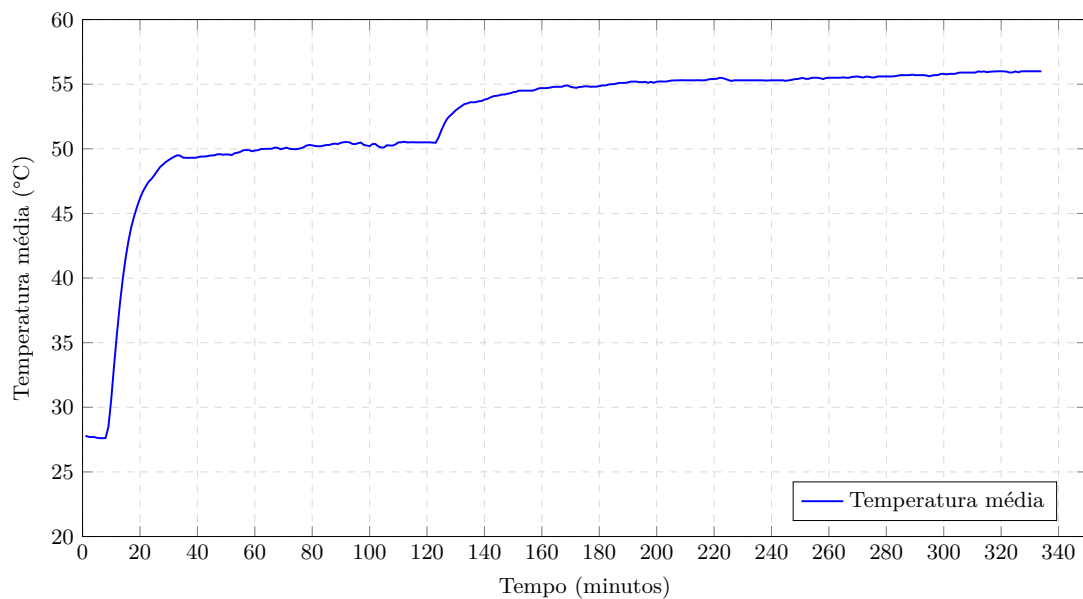


Figura 3.15 – Resposta térmica da planta ao degrau de potência máxima.

3.8.2 Aplicação do Método de Ziegler–Nichols (Reação ao Degrau)

O método de Ziegler–Nichols para ajuste de controladores PID em sistemas que podem ser aproximados por um modelo de primeira ordem com atraso baseia-se na construção da reta tangente no ponto de máxima inclinação da resposta ao degrau [4]. A partir dessa reta, determinam-se três parâmetros fundamentais do modelo: ganho estático, tempo morto e constante de tempo.

Para o conjunto de dados obtidos na experimentação, aplicou-se uma regressão linear

em janela móvel a fim de suavizar ruídos e identificar com precisão o ponto de máxima inclinação. O procedimento resultou no instante:

$$t_0 = 3 \text{ min}, \quad y_0 = 33,29^\circ\text{C},$$

com inclinação máxima

$$m = 2,414^\circ\text{C}/\text{min}.$$

A reta tangente associada a esse ponto é então dada por:

$$y(t) = y_0 + m(t - t_0) = 33,29 + 2,414(t - 3).$$

O **tempo morto** L é obtido pela interseção dessa tangente com a temperatura inicial do processo, $y_{\text{ini}} = 27,62^\circ\text{C}$:

$$27,62 = 33,29 + 2,414(t - 3) \quad \Rightarrow \quad L = 0,65 \text{ min}.$$

Da mesma forma, a interseção da tangente com o valor final da resposta, $y_\infty = 56^\circ\text{C}$, fornece o termo $L + T$:

$$56 = 33,29 + 2,414(t - 3) \quad \Rightarrow \quad L + T = 12,41 \text{ min},$$

de onde se obtém a **constante de tempo**:

$$T = (L + T) - L = 11,76 \text{ min}.$$

O ganho estático do processo é calculado pela variação de temperatura produzida pelo degrau unitário aplicado ao atuador:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{56 - 27,62}{1} = 28,38.$$

Com esses valores, aplicam-se as fórmulas clássicas de Ziegler–Nichols para controladores PID derivados da reação ao degrau:

$$K_p = 1,2 \frac{T}{K L}, \quad T_i = 2L, \quad T_d = 0,5L.$$

Substituindo-se os valores obtidos experimentalmente:

$$K_p = 0,765, \quad K_i = \frac{K_p}{T_i} = 0,588, \quad K_d = K_p T_d = 0,249.$$

A Figura 3.16 ilustra a construção gráfica da reta tangente, bem como a determinação de L , T e do ponto de máxima inclinação, conforme o procedimento recomendado por Ogata [8].

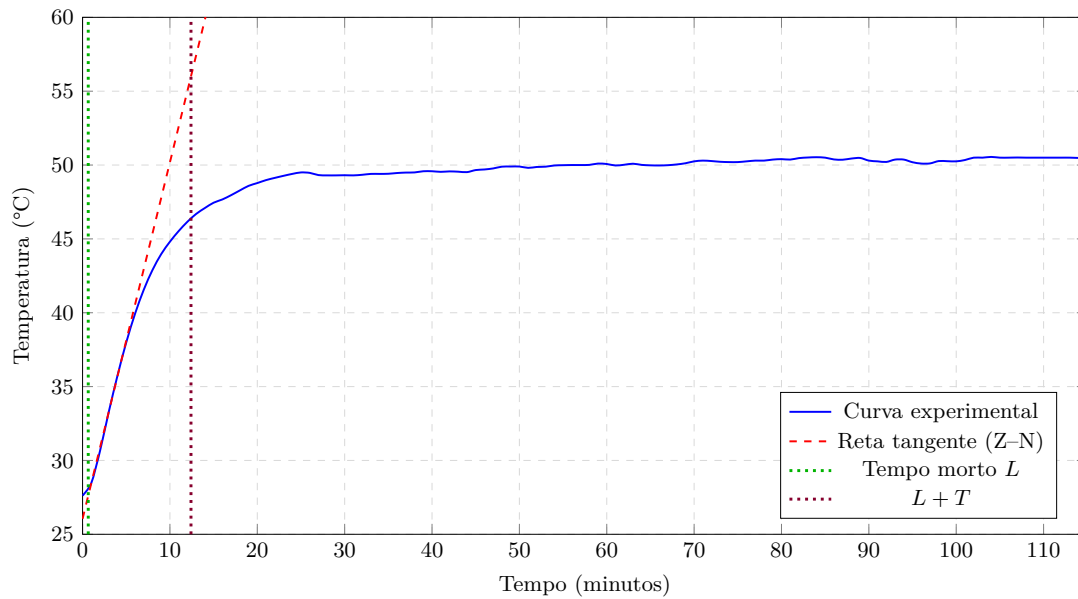


Figura 3.16 – Determinação gráfica de L , T e do ponto de máxima inclinação pelo método de Ziegler–Nichols.

Os parâmetros obtidos foram utilizados na implementação do controlador PID no microcontrolador ESP32, resultando em uma malha de controle capaz de estabilizar a temperatura da câmara incubadora com alta precisão.

3.9 Controle de Umidade

O controle de umidade da incubadora é realizado por meio de uma lógica de histerese, na qual o módulo de umidificação é acionado apenas quando a umidade medida cai abaixo de um limite inferior e é desligado ao ultrapassar o limite superior. Esse método evita acionamentos sucessivos em intervalos curtos, reduz o desgaste do atuador e mantém a umidade dentro da faixa adequada ao desenvolvimento embrionário.

A dinâmica do processo de umidificação é mais lenta do que a do aquecimento, o que torna o controle por histerese uma alternativa eficiente e de baixo custo computacional, sem necessidade de técnicas de controle contínuo ou PID.

Parâmetros utilizados no sistema:

- Sensor de leitura: DHT22 (umidade relativa)
- Limiar inferior (acionamento): configurável pelo usuário
- Limiar superior (desligamento): configurável pelo usuário
- Atuador: módulo de umidificação em 12 V (via relé)
- Faixa típica de controle: 45%-65% UR (dependente da espécie incubada)

3.10 Controle de rotação dos ovos

A rotação dos ovos é realizada por um motor DC acionado por relé, com controle ON/OFF para determinar o instante de rolagem. Entretanto, a velocidade do motor não é fixa; ela é ajustada por meio de um estágio de controle baseado em PWM analógico, composto por um transistor TIP41 e um potenciômetro, permitindo regular a rotação conforme a necessidade do mecanismo.

Essa abordagem é adequada ao processo, pois a rotação dos ovos ocorre de forma intermitente e não exige controle preciso de posição. O ON/OFF define o momento de acionamento, enquanto o circuito com TIP41 permite limitar a velocidade e evitar movimentos bruscos, garantindo uma rolagem suave e minimizando os esforços no conjunto mecânico.

3.10.1 Sistema de rolagem dos ovos

O sistema de rolagem dos ovos da chocadeira foi projetado para garantir a movimentação contínua, uniforme e controlada das bandejas, obedecendo às recomendações técnicas de incubação para melhoria da taxa de eclosão. O mecanismo desenvolvido consiste em uma esteira composta por diversos rolamentos cilíndricos paralelos, acionados simultaneamente por um conjunto de engrenagens acopladas a um eixo motriz com rosca sem-fim. A Figura 3.17 ilustra o modelo tridimensional do conjunto.

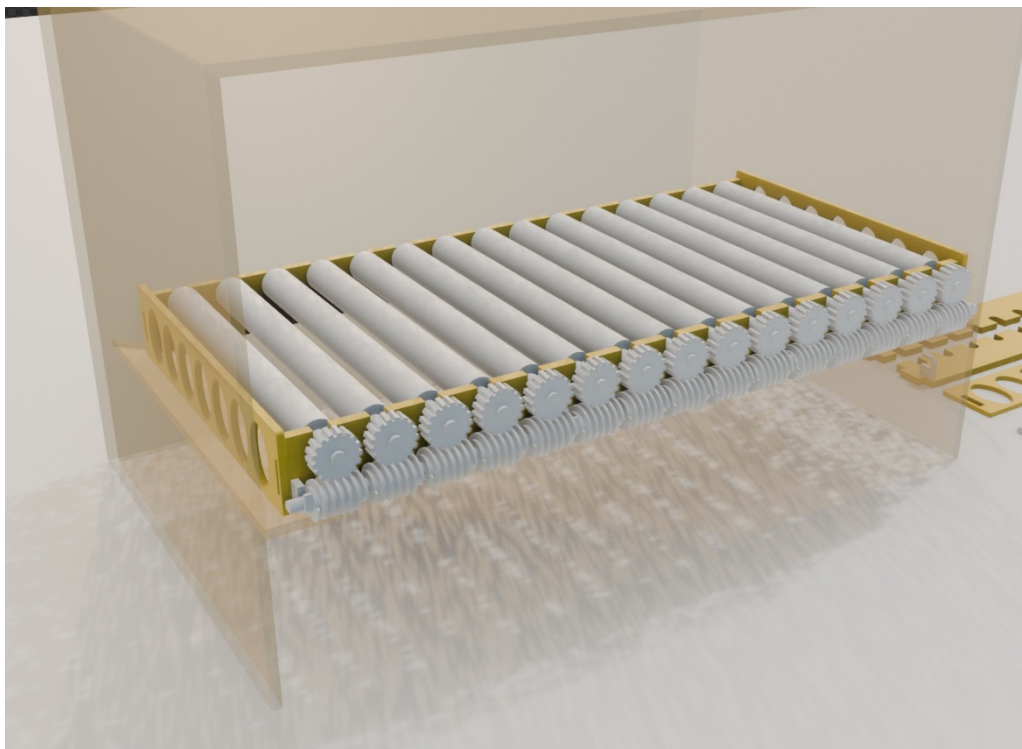


Figura 3.17 – Modelo tridimensional do sistema de rolagem desenvolvido para a chocadeira.

3.10.1.1 Arquitetura mecânica do sistema

O sistema é composto por um conjunto de roletes cilíndricos dispostos em paralelo, formando uma superfície contínua onde os ovos são posicionados. Cada rolete possui, em uma de suas extremidades, uma engrenagem solidária ao seu eixo. Essas engrenagens são alinhadas lado a lado e engatadas com a rosca sem-fim posicionada na face frontal do conjunto.

A rosca sem-fim (*worm shaft*) transmite o torque do motor ao conjunto de engrenagens, garantindo a rotação uniforme dos roletes. A estrutura de suporte, impressa em PLA e projetada para operar na faixa térmica da incubadora (36–38 °C), mantém o alinhamento dos roletes e engrenagens, assegurando a movimentação contínua do mecanismo. Embora o PLA não seja indicado para aplicações a altas temperaturas, sua resistência térmica é suficiente para as condições de operação do protótipo.

3.10.2 Motorização e acionamento elétrico

O movimento da rosca sem-fim é realizado por um motor DC proveniente de uma impressora, escolhido por sua durabilidade, baixa vibração e torque adequado para acionamento contínuo e de baixa velocidade. O motor é alimentado pelo barramento de 12V da chocadeira e seu acionamento é feito por meio de um módulo relé de estado mecânico, que permite ligar e desligar o sistema de rolagem conforme a lógica de controle programada no ESP32.

O uso do relé simplifica o controle, permitindo ao microcontrolador ativar o motor apenas nos intervalos desejados, respeitando a cadência de rolagem programada no firmware.

3.10.3 Regulação de velocidade do motor

A velocidade do motor responsável pela rolagem dos ovos é ajustada por meio de um circuito analógico composto por um transistor TIP41 e um potenciômetro de 5,1 k Ω . O TIP41 atua como um elemento de controle em série, modulando a corrente fornecida ao motor de acordo com a polaridade aplicada à sua base.

O potenciômetro ajusta o nível de polarização da base do TIP41, variando a condução do transistor e, conseqüentemente, a velocidade do motor. Esse arranjo funciona como um limitador analógico simples, permitindo reduzir a velocidade de forma contínua sem necessidade de modulação digital (PWM).

A solução apresenta baixo custo, fácil implementação e fornece velocidade estável e suave para o mecanismo de rolagem, reduzindo vibrações, impactos mecânicos e facilitando a calibração de acordo com diferentes cargas de operação. Figura 3.18 ilustra o modelo o circuito eletrônico construído.

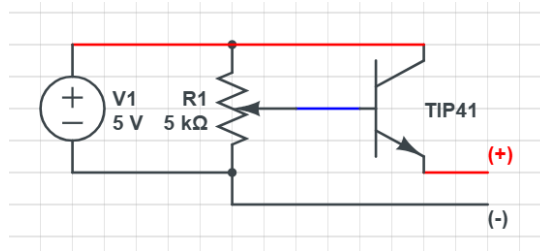


Figura 3.18 – Driver de motor DC com transistor NPN

3.10.4 Integração com o controle da chocadeira

O ESP32 comanda o sistema de rolagem por meio do módulo relé, ativando o motor em ciclos periódicos definidos pelo usuário ou em modo automático. Quando acionado, o motor transmite torque à rosca sem-fim, que move as engrenagens e faz com que todos os roletes girem de forma sincronizada.

Essa solução elimina a necessidade de motores independentes para cada rolete, reduzindo custo, consumo energético e complexidade de montagem, ao mesmo tempo em que garante confiabilidade e repetibilidade no processo de rolagem dos ovos.

Por sua construção modular, o sistema também permite expansão para incubadoras de maior capacidade, bastando estender o comprimento dos roletes e adicionar engrenagens ao eixo de transmissão, sem necessidade de alterar o princípio de funcionamento.

3.11 Estrutura de Software

O software embarcado foi desenvolvido em linguagem C++ na IDE Arduino, sendo executado no microcontrolador ESP32. Sua estrutura modular garante uma separação clara entre os blocos de aquisição de dados, controle de processo, interface com o usuário e lógica de operação da incubação. A Figura conceitual do programa (não incluída aqui) pode ser vista como uma sequência de laços de leitura, de controle e de atualização.

A seguir, são descritos os principais módulos do código-fonte do sistema.

3.11.1 Aquisição de Dados

A leitura de temperatura e umidade é realizada pelo sensor digital DHT22, conectado à porta 5 do ESP32. O sensor é configurado e inicializado conforme o trecho de código:

```
1 #define DHTPIN 5
2 #define DHTTYPE DHT22
3 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

Código 1 – Inicialização do sensor DHT22.

As leituras são realizadas de forma periódica no laço principal, e verificadas quanto à validade:

```
1 float tempAtual = dht.readTemperature();
2 float umidAtual = dht.readHumidity();
3
4 if (isnan(tempAtual) || isnan(umidAtual)) return; // descarta leituras inválidas
```

Código 2 – Aquisição de temperatura e umidade.

Essas variáveis são utilizadas nas rotinas de controle e atualização de display.

3.11.2 Controle de Temperatura e Segurança Térmica

O controle de temperatura utiliza um controlador PID digital da biblioteca `PID_v1.h`, que ajusta a potência do aquecedor via modulação PWM. O controlador segue a equação clássica do PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

onde $e(t)$ representa o erro entre a temperatura medida e a temperatura de referência. Os parâmetros adotados ($K_p = 0.765$, $K_i = 0.588$, $K_d = 0.249$) foram ajustados empiricamente para resposta estável e sem oscilações.

As variáveis do controlador são declaradas e configuradas conforme o trecho abaixo:

```
1 double inputTemp, outputPWM, setpointTemp;
2 double kp = 0.765, ki = 0.588, kd = 0.249;
3 PID tempPID(&inputTemp, &outputPWM, &setpointTemp, kp, ki, kd, DIRECT);
4
5 void setup() {
6     tempPID.SetMode(AUTOMATIC);
7     tempPID.SetOutputLimits(0, 255); // faixa de PWM
8 }
```

Código 3 – Configuração do controlador PID de temperatura.

A função responsável pelo controle PID é chamada em cada ciclo de leitura:

```

1 void controleTemperatura(float setPoint, float tempAtual) {
2     verificarSegurancaTermica(tempAtual); // proteção térmica
3     if (modoSeguro) { setPWM(0); return; } // pausa se superaquecido
4
5     setpointTemp = setPoint;
6     inputTemp = tempAtual;
7     tempPID.Compute(); // calcula ação PID
8     setPWM((int)round(outputPWM)); // aplica PWM ao aquecedor
9 }

```

Código 4 – Controle de temperatura com PID.

Para garantir a integridade do sistema, foi implementada uma rotina de segurança térmica que interrompe o aquecimento se a temperatura ultrapassar 40°C, retornando o controle apenas quando ela cair abaixo de 38°C:

```

1 bool modoSeguro = false;
2
3 void verificarSegurancaTermica(float tempAtual) {
4     if (!modoSeguro && tempAtual >= 40.0) {
5         modoSeguro = true;
6         setPWM(0);
7         desligarRele(RELE_UMIDADE);
8         tft.fillScreen(ST77XX_RED);
9         tft.println(" SUPERAQUECIMENTO!");
10    }
11    if (modoSeguro && tempAtual <= 38.0) {
12        modoSeguro = false;
13        Serial.println("Temperatura normalizada");
14    }
15 }

```

Código 5 – Rotina de segurança térmica.

Essa lógica de segurança evita danos à chocadeira e aos ovos, garantindo operação segura mesmo em caso de falhas nos sensores ou no aquecimento.

3.11.3 Controle de Umidade e Rotação

A umidade é controlada por histerese, ligando e desligando o nebulizador quando os valores medidos ficam fora da faixa ideal. Essa estratégia é mais estável e evita desgaste do relé.

```

1 void controleUmidade(float umidMin, float umidMax, float umidAtual) {
2     if (!umidificadorLigado && umidAtual <= umidMin) {
3         ligarRele(RELE_UMIDADE);
4         umidificadorLigado = true;
5     }
6     else if (umidificadorLigado && umidAtual >= umidMax) {
7         desligarRele(RELE_UMIDADE);
8         umidificadorLigado = false;
9     }
10 }

```

Código 6 – Controle de umidade com histerese.

Já o controle de rotação é realizado automaticamente a cada seis horas, mantendo o motor acionado por cinco segundos. O algoritmo não utiliza funções bloqueantes como `delay()`, o que permite que o sistema continue lendo sensores e controlando temperatura simultaneamente:

```

1 const unsigned long intervaloRotacao = 6UL * 60UL * 60UL * 1000UL; // 6h
2 const unsigned long ROTATION_ON_MS = 5000; // 5 segundos
3
4 void controleRotacao() {
5     unsigned long agora = millis();
6     if (primeiraRotacao && (agora - tempoInicial >= 60000)) {
7         primeiraRotacao = false;
8         lastRotacaoMillis = agora;
9         ligarRele(RELE_ROTACAO);
10    }
11    if (!primeiraRotacao && (agora - lastRotacaoMillis < ROTATION_ON_MS)) {
12        ligarRele(RELE_ROTACAO);
13    }
14    else if (agora - lastRotacaoMillis >= ROTATION_ON_MS &&
15             agora - lastRotacaoMillis < intervaloRotacao) {
16        desligarRele(RELE_ROTACAO);
17    }
18    if (agora - lastRotacaoMillis >= intervaloRotacao) {
19        lastRotacaoMillis = agora;
20        ligarRele(RELE_ROTACAO);
21    }
22 }

```

Código 7 – Rotina de rotação automática dos ovos.

Esse método garante a viragem periódica e homogênea dos ovos, essencial para o desenvolvimento embrionário adequado. O intervalo de viragem (6 horas) segue reco-

mendações de manuais técnicos da Embrapa [6], assegurando distribuição homogênea do calor e evitando aderência embrionária.

3.11.4 Gestão das Espécies

Os parâmetros de incubação e eclosão utilizados nesta etapa são valores fictícios, definidos exclusivamente para fins de demonstração e validação do sistema. Os parâmetros definitivos serão posteriormente revisados e ajustados em conjunto com profissionais das áreas de Biologia e Zootecnia, de modo a assegurar conformidade com as condições reais de desenvolvimento embrionário de cada espécie. Abaixo apresenta-se a estrutura de dados (**struct**) responsável por armazenar as características de incubação e o vetor de espécies pré-cadastradas.

```
1 struct Especie {
2     String nome;
3     int tempoIncubacao;
4     int tempoEclosao;
5     float tempIncubacao;
6     float umidadeMinIncubacao;
7     float umidadeMaxIncubacao;
8     float tempEclosao;
9     float umidadeMinEclosao;
10    float umidadeMaxEclosao;
11 };
12
13 Especie especies[16] = {
14     {"Galinha", 19, 3, 37.5, 50, 60, 37.0, 65, 75},
15     {"Pato", 25, 3, 37.5, 55, 60, 37.0, 70, 80},
16     {"Codorna", 16, 2, 37.5, 50, 55, 37.0, 65, 75},
17     {"Peru", 28, 3, 37.5, 55, 60, 37.0, 70, 80},
18     {"Avestruz", 42, 3, 36.5, 20, 25, 36.0, 30, 40},
19     {"Ganso", 30, 3, 37.3, 50, 60, 37.0, 65, 75},
20     {"Pombo", 17, 3, 37.5, 50, 60, 37.0, 70, 80},
21     {"Canario", 14, 2, 37.7, 55, 65, 37.2, 60, 70},
22     {"Marreco", 28, 3, 37.5, 50, 55, 37.0, 65, 75},
23     {"Cisne", 30, 3, 37.5, 50, 60, 37.0, 65, 75},
24     {"Codorna-gigante", 16, 2, 37.5, 55, 60, 37.0, 65, 75},
25     {"Arara", 28, 3, 36.8, 45, 55, 36.5, 60, 70},
26     {"Papagaio", 26, 3, 37.0, 50, 55, 36.8, 65, 75},
27     {"Pinguim", 35, 4, 36.5, 40, 50, 36.0, 50, 60},
28     {"Jacare", 65, 3, 32.5, 80, 90, 32.0, 85, 95},
29     {"Tartaruga", 70, 3, 31.5, 70, 80, 31.0, 75, 85}
30 };
```

Código 8 – Estrutura e vetor de espécies.

Essa abordagem permite selecionar facilmente os parâmetros adequados à espécie,

automatizando a configuração do processo de incubação.

3.11.5 Interface com o Usuário

A interface homem-máquina é composta pelo *display* TFT ST7735, pelo teclado matricial 4x4 e pelo *encoder* rotativo KY-040. O *display* é responsável por exibir informações em tempo real sobre a fase, espécie e condições ambientais:

```
1 tft.println("Fase: " + fase);  
2 tft.println("Especie: " + nomeEspecie);  
3 tft.print("Temp: "); tft.print(tempAtual, 1); tft.println(" C");  
4 tft.print("Umid: "); tft.print(umidAtual, 0); tft.println(" %");
```

Código 9 – Atualização das informações no *display*.

O teclado é utilizado para navegar pelos menus e selecionar espécies, enquanto o *encoder* define valores de forma contínua no modo manual, facilitando ajustes de precisão.

3.11.6 Rotinas de Incubação e Eclosão

As rotinas `rotinaIncubacao()` e `rotinaEclosao()` englobam todos os módulos anteriores, coordenando o controle térmico, a umidade, a rotação e a atualização do *display*. Essas funções são executadas de forma contínua durante todo o processo:

```
1 void rotinaIncubacao() {  
2     Especie &esp = especies[especieSelecionada];  
3     float temp = dht.readTemperature();  
4     float umid = dht.readHumidity();  
5  
6     controleTemperatura(esp.tempIncubacao, temp);  
7     controleUmidade(esp.umidadeMinIncubacao, esp.umidadeMaxIncubacao, umid);  
8     controleRotacao();  
9     atualizarDisplay("Incubacao", temp, umid, tempoDecorrido, esp.nome);  
10 }
```

Código 10 – Rotina principal de incubação.

A rotina de eclosão é semelhante, mas utiliza os parâmetros específicos dessa fase:

```

1 void rotinaEclosao() {
2     Especie &esp = especies[especieSelecionada];
3     float temp = dht.readTemperature();
4     float umid = dht.readHumidity();
5
6     controleTemperatura(esp.tempEclosao, temp);
7     controleUmidade(esp.umidadeMinEclosao, esp.umidadeMaxEclosao, umid);
8     atualizarDisplay("Eclosao", temp, umid, tempoDecorrido, esp.nome);
9 }

```

Código 11 – Rotina principal de eclosão.

Essas rotinas possibilitam o funcionamento contínuo e automático da chocadeira, mantendo o ambiente nas condições ideais durante o ciclo de incubação.

Em conjunto, os módulos do software formam um sistema embarcado robusto, seguro e modular, capaz de realizar o controle térmico, de umidade e de rotação de forma integrada e confiável.

3.11.7 Persistência de Estado (NVS)

Além do armazenamento externo em cartão microSD, o sistema utiliza a memória interna não volátil do ESP32, baseada na *Non-Volatile Storage* (NVS), para salvar informações críticas relacionadas ao funcionamento da incubadora. A NVS é empregada para registrar parâmetros operacionais essenciais, como o modo de operação corrente, limites de temperatura e umidade, progresso da incubação e estado do ciclo no momento da última execução.

O uso da NVS garante que, em caso de interrupção no fornecimento de energia ou reinicialização inesperada, o equipamento seja capaz de retomar o processo a partir do ponto em que parou, sem exigir reconfiguração manual por parte do usuário. Essa abordagem aumenta a robustez do sistema e reduz o risco de perda de dados operacionais importantes, diferindo do cartão microSD, cujo objetivo principal é o registro histórico para análise posterior.

A biblioteca `Preferences.h` foi utilizada para gerenciar a escrita e leitura desses dados persistentes, devido à sua estabilidade, simplicidade e adequação ao ambiente embarcado do ESP32. Assim, a memória interna atua como um mecanismo de segurança e continuidade de operação, complementando o armazenamento externo destinado exclusivamente à análise científica e documentação do processo.

3.12 Fluxo de operação

O fluxograma da Figura 3.19 resume a sequência lógica das etapas executadas pelo software descrito na Seção 3.11. O processo inicia com a seleção do modo (automático ou manual), segue com a configuração dos parâmetros, e então executa as rotinas de incubação e eclosão até o encerramento do ciclo.

Para facilitar a utilização do equipamento, foi elaborado um manual operacional, que encontra-se em anexo, apresentando o passo a passo completo da operação, permitindo que o usuário siga as instruções de forma segura e precisa.

Durante a operação, destacam-se quatro botões principais que controlam as rotinas do equipamento:

- O botão **Estrela (*)** permite a navegação automática espécies já cadastradas.
- O botão **0** habilita o modo manual, proporcionando ao usuário maior flexibilidade e controle direto sobre as operações da chocadeira.
- O botão **Hashtag (#)** tem a função de iniciar o processo de incubação, acionando a sequência automatizada de funcionamento.
- O botão **D** encerra a rotina em execução e retorna o sistema à página inicial, possibilitando uma interrupção segura do processo.

O manual anexo serve como guia completo, detalhando cada etapa do fluxo de operação, bem como a utilização correta de cada botão, garantindo que o usuário possa operar o equipamento de forma eficaz e sem comprometer a integridade do processo de incubação.

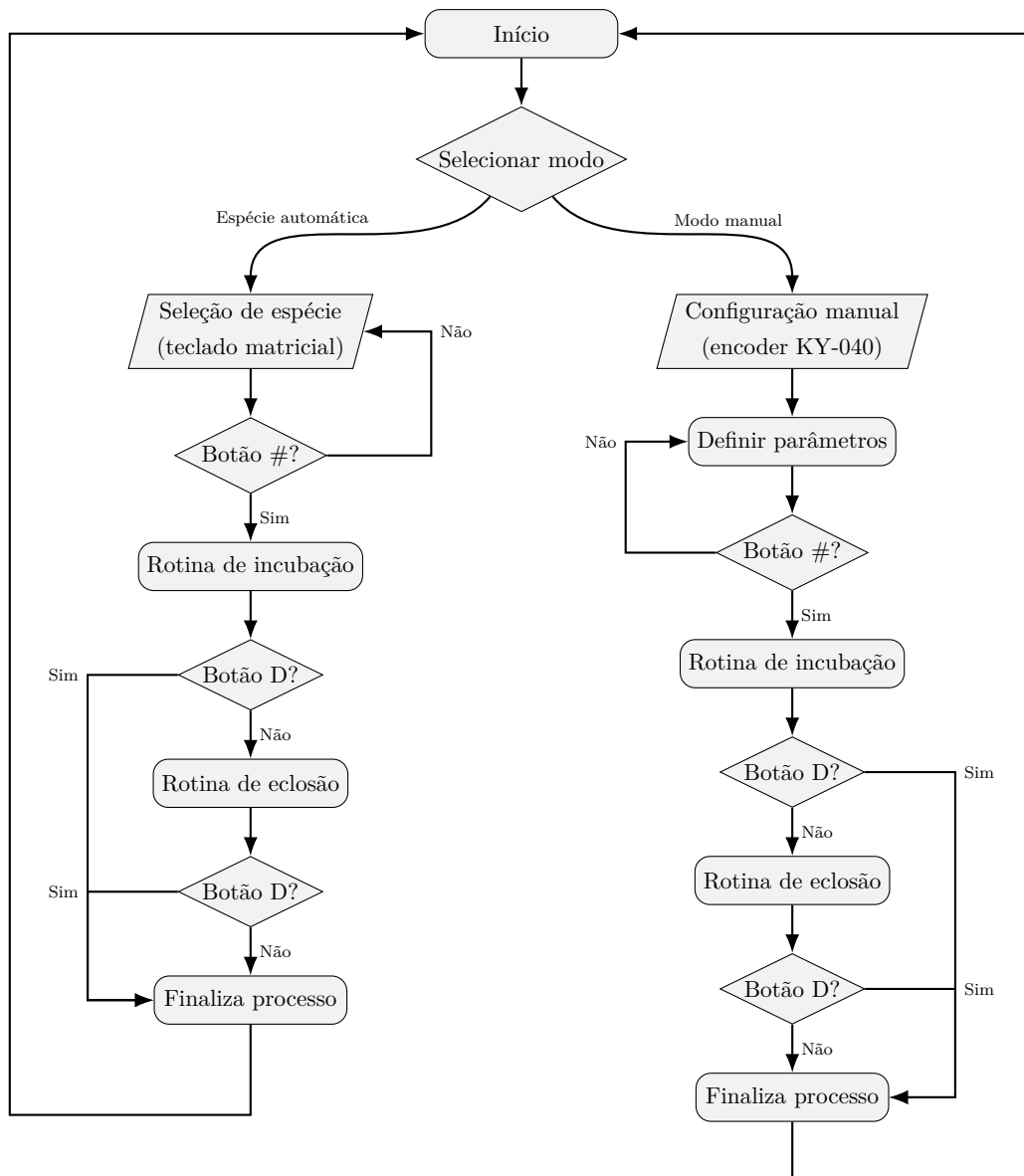


Figura 3.19 – Fluxograma do fluxo de operação do sistema.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Resultados do Controle PID

O controle de temperatura da chocadeira foi implementado utilizando um *controlador PID digital*, atuando sobre a cama aquecida de impressora 3D de 12 V e potência nominal de 120 W. O controle é aplicado por meio de modulação PWM via MOSFET de potência, tendo como objetivo manter a temperatura interna da câmara próxima à referência de 37,5°C, com o menor erro estacionário e *overshoot* possíveis, assegurando estabilidade térmica adequada ao processo de incubação.

O sinal de realimentação é fornecido pelo sensor DHT22, posicionado na região central da câmara. Como o sensor possui tempo de resposta lento, o tempo de amostragem do controlador digital foi ajustado para 2 s. O algoritmo de controle foi dividido em duas fases:

- **Fase 1 Aquecimento bruto:** o aquecedor é acionado com potência fixa (PWM = 140) até que a temperatura alcance o setpoint menos 0.5°C;
- **Fase 2 Controle fino:** o controlador PID é ativado com ganhos conservadores ($K_p = 0.765$, $K_i = 0.588$, $K_d = 0.249$), saída limitada em 100, zona morta de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ e proteção adicional contra *overshoot*, reduzindo o PWM para 10 quando a temperatura atinge ou ultrapassa o setpoint.

A adoção de duas etapas de controle, aquecimento bruto inicial seguido pelo ajuste fino com PID, mostrou-se necessária devido às características dinâmicas do sistema térmico. Durante a fase inicial, o erro entre a temperatura ambiente e o setpoint é elevado e o sensor DHT22 apresenta resposta lenta, tornando o PID inadequado para conduzir a subida térmica, pois operaria saturado por longos períodos e atrasaria o aquecimento. Ao aplicar potência fixa nessa etapa, a câmara atinge rapidamente a faixa de operação desejada. Quando a temperatura se aproxima do ponto de referência, o controlador PID é ativado, permitindo estabilização precisa com mínimo *overshoot*, compensando a inércia

térmica da MK2B e a defasagem de medição do sensor. Essa estratégia híbrida, com controle em malha aberta na aproximação e malha fechada no regime estacionário, é recomendada em sistemas térmicos de alta inércia e encontra suporte na literatura de controle clássico e automação industrial.

4.1.1 Estabilidade de Temperatura

Nos ensaios realizados para o controle de temperatura, o sistema demonstrou um comportamento coerente com o esperado para um controlador PID bem ajustado. Observou-se que o PID atuou exatamente conforme prevê a teoria, reagindo às variações térmicas, corrigindo rapidamente desvios e conduzindo o sistema ao regime permanente de forma eficiente.

A análise detalhada dos dados evidencia que o sistema levou aproximadamente 20 minutos para atingir o regime permanente, período no qual a temperatura converge gradualmente até estabilizar dentro da faixa ideal. Durante esse intervalo inicial, pequenas oscilações são esperadas, pois fazem parte do processo de correção do erro pelo controlador PID.

A Figura 4.1 apresenta o comportamento temporal da temperatura ao longo de 4.800 segundos de experimento, com amostragem realizada segundo a segundo. Nessa escala mais sensível, é possível perceber pequenas flutuações, típicas de processos térmicos controlados por PID. Apesar dessas variações de curto prazo, a temperatura rapidamente retorna aos valores desejados, mantendo-se dentro dos limites operacionais.

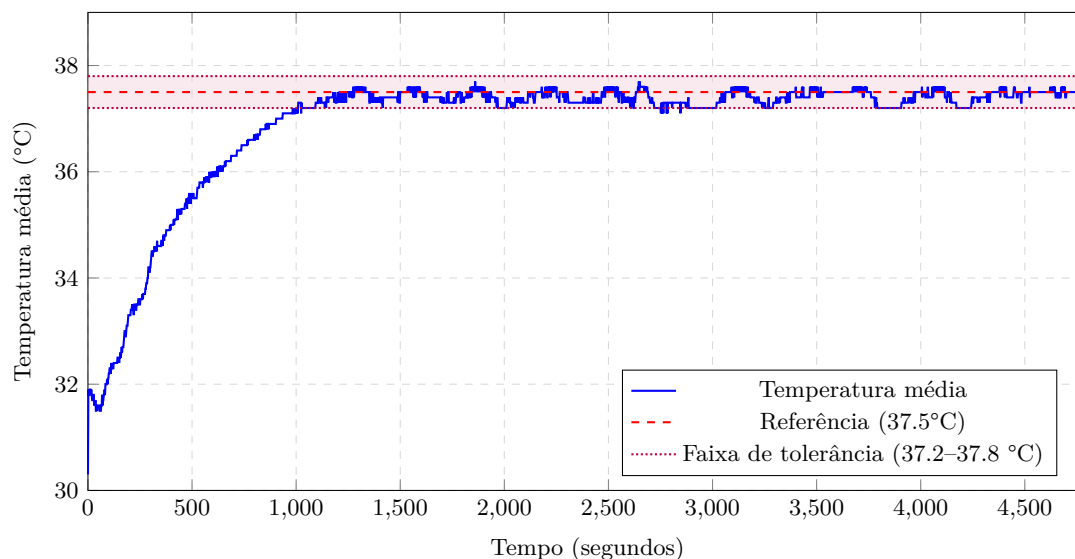


Figura 4.1 – Comportamento da temperatura ao longo de 4.800 segundos, mostrando a atuação do PID em tempo real.

Para uma análise mais interpretável, os mesmos dados foram agrupados em médias por minuto, resultando em aproximadamente 80 amostras. A Figura 4.2 ilustra esse comportamento suavizado. Quando observada nessa escala, torna-se ainda mais claro

que o sistema permanece significativamente estável, com a temperatura oscilando dentro da faixa de tolerância estabelecida, entre $37,2^{\circ}\text{C}$ e $37,8^{\circ}\text{C}$.

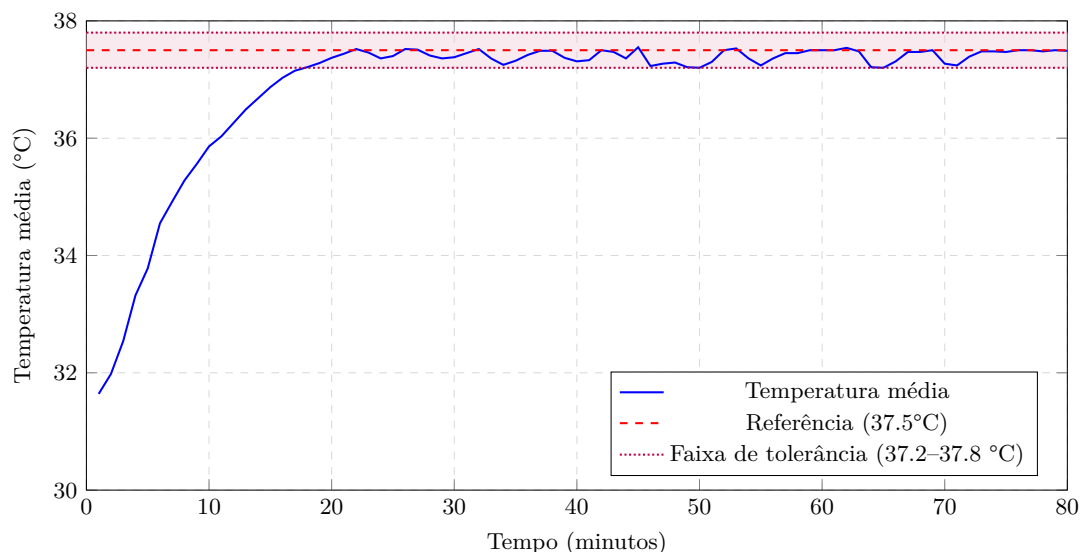


Figura 4.2 – Comportamento da temperatura em médias por minuto, evidenciando a estabilidade fornecida pelo controle PID.

Assim, tanto a visualização em segundos quanto a representação suavizada por minuto demonstram que o controlador PID é capaz de manter a temperatura dentro da faixa ideal de operação. As pequenas flutuações observadas fazem parte do comportamento normal de um sistema térmico com controle em malha fechada, mas não comprometem a estabilidade geral. Conclui-se, portanto, que o PID operou de maneira eficiente, mantendo a temperatura dentro de $37,2^{\circ}\text{C}$ a $37,8^{\circ}\text{C}$ e garantindo condições adequadas para a incubação.

4.1.2 Eficiência Energética e Estabilidade

Durante o ensaio de 210 min, o valor médio do sinal PWM foi de aproximadamente 87% do limite máximo (122/140), o que equivale a uma potência média de 105 W aplicada sobre a carga de 120 W. Extrapolando esse perfil de operação para um ciclo contínuo de 25 dias (600 h), o consumo estimado é de cerca de 63 kWh, resultando em um custo aproximado de R\$ 55,00 considerando a tarifa residencial vigente.

Após a otimização do código, com limitação do PWM máximo para 100 e redução do *sopro final* para 10, a potência média caiu para aproximadamente 78 W, reduzindo o consumo mensal estimado para R\$ 41,00, sem prejuízo da estabilidade térmica. Em comparação, uma chocadeira convencional com lâmpada incandescente de 100 W apresenta consumo próximo de 60 kWh/mês (R\$ 53,00), mas com variações térmicas superiores a $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, evidenciando que o sistema proposto é mais preciso e energeticamente eficiente.

4.1.3 Conclusão Parcial

O controle PID apresentou desempenho estável, resposta rápida e mínima sobrelevação. A temperatura manteve-se próxima à referência de 37°C, dentro da faixa biológica ideal para o desenvolvimento embrionário. Os resultados comprovam a eficácia do sistema de controle digital, demonstrando que a cama aquecida controlada por PWM e PID oferece precisão térmica e segurança superiores às chocadeiras convencionais baseadas em lâmpadas incandescentes.

4.1.4 Estabilidade de Umidade

Durante os ensaios de controle de umidade, o sistema demonstrou capacidade de manter níveis adequados para as fases de incubação e eclosão, operando dentro da faixa estipulada para a espécie de 50–60%. Esses valores seguem as referências para incubação artificial de aves e confirmam tanto a calibração correta do sensor DHT22 quanto a eficiência do controle por histerese utilizado no acionamento do nebulizador.

A Figura 4.3 apresenta o comportamento da umidade ao longo de 4.800 segundos de experimento, com amostragem realizada a cada segundo. Nessa escala mais detalhada, é possível observar precisamente os instantes em que o sistema cruza os limites da histerese, acionando ou desligando o atuador. Observa-se, ao longo da coleta de dados, uma queda abrupta em torno de 2.500 segundos, a qual interrompeu temporariamente a estabilização da curva. É possível inferir que tal queda tenha sido ocasionada por uma eventual abertura do equipamento durante seu funcionamento, provocando uma pequena perturbação. Contudo, verifica-se que o sistema retomou seu equilíbrio posteriormente, apesar do evento ocorrido. Essa visualização evidencia que o controle responde exatamente quando necessário, mantendo a umidade dentro da faixa definida.

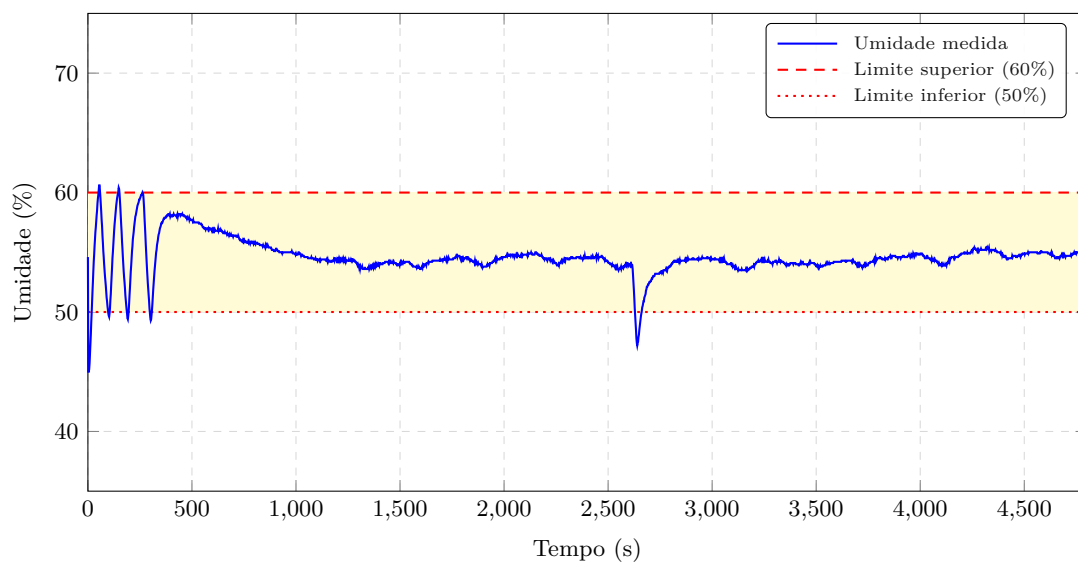


Figura 4.3 – Comportamento da umidade ao longo de 4.800 segundos, mostrando o controle por histerese em tempo real.

Para avaliar a estabilidade em uma escala temporal mais ampla, os mesmos dados foram reprocessados em médias de um minuto, resultando em aproximadamente 80 pontos de amostragem. A Figura 4.4 ilustra esse comportamento suavizado. Nesta representação, nota-se que, considerando a média por minuto, a umidade praticamente não ultrapassa os limites da histerese. Isso reforça que, mesmo com pequenas oscilações naturais no segundo a segundo, o sistema mantém a umidade de forma extremamente estável ao longo do tempo.

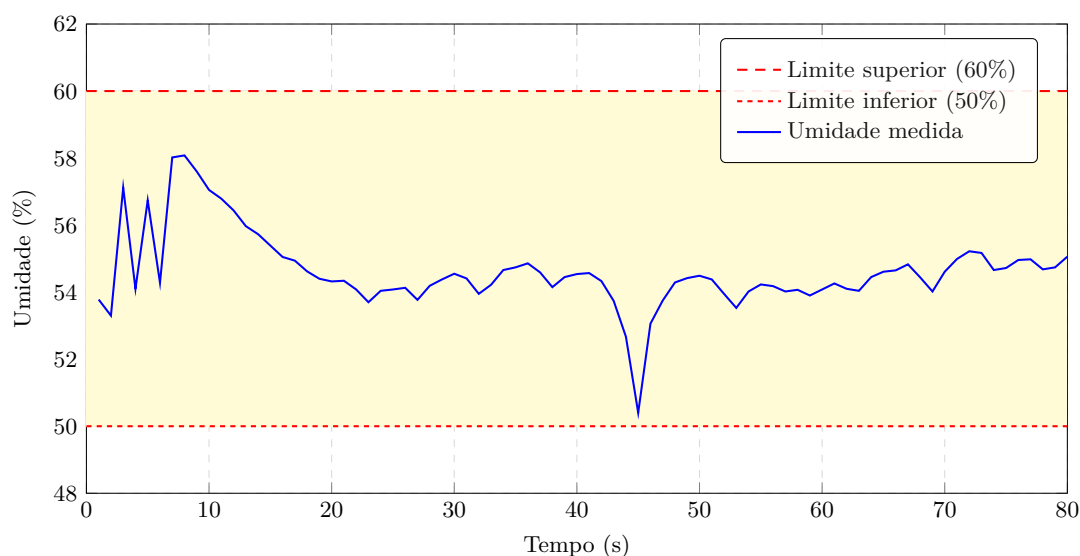


Figura 4.4 – Comportamento da umidade em médias por minuto, evidenciando alta estabilidade do sistema.

Dessa forma, tanto a análise detalhada em segundos quanto a análise consolidada por minuto demonstram que o controle de umidade opera de forma eficiente, confiável e dentro dos parâmetros necessários para garantir boas condições de incubação.

4.1.5 Interface de operação

A interface desenvolvida mostrou-se funcional e intuitiva, permitindo o ajuste de parâmetros de temperatura, umidade e tempo por meio do teclado matricial e do encoder rotativo. O display gráfico possibilitou o acompanhamento em tempo real das variáveis de processo, oferecendo ao operador uma visualização clara da evolução das grandezas controladas e do tempo total de incubação. A solução proposta dispensou a necessidade de interface externa, favorecendo a autonomia do sistema.

4.1.6 Estimativa de custo de produção e escalabilidade da solução

Apresentam-se nesta subseção os custos de produção do protótipo, considerando apenas os componentes de hardware (eletrônicos, eletromecânicos e estrutura física), bem

como uma estimativa de escalabilidade da solução para capacidades maiores de incubação.

4.1.6.1 Custo de produção do protótipo

Os valores de custo foram obtidos a partir de consultas a fornecedores nacionais de componentes eletrônicos e de automação entre outubro e novembro de 2025, considerando compras em pequena escala (1 a 5 unidades). Dessa forma, os preços apresentados são aproximados e sujeitos a variações de acordo com o fornecedor, a cotação do dólar e o volume de aquisição.

A Tabela 4.1 resume os principais elementos de hardware empregados no protótipo, incluindo a placa de aquecimento MK2B utilizada para o controle térmico da câmara.

Tabela 4.1 – Estimativa de custo de hardware do protótipo da chocadeira.

Componente	Qtde	Custo aprox. (R\$)
ESP32 DevKit V1	1	35,00
<i>Display</i> TFT 1,8" (ST7735)	1	60,00
Sensor DHT22	1	22,00
<i>Encoder</i> rotativo	1	15,00
Placa de aquecimento MK2B (12 V / 120 W)	1	45,00
Módulos relé (umidade, rotação)	2	28,00
MOSFET de potência (controle térmico)	1	10,00
Fonte chaveada 12 V / 15 A	1	30,00
Conversor DCDC 5 V	1	10,00
Motor para rotação dos ovos	1	25,00
Ventiladores internos 60E60 mm	1	30,00
Cabeamento, conectores e ferragens	–	25,00
Estrutura física e isolamento térmico	–	250,00
Impressos 3D (bandeja para 6 ovos e suportes)	1	40,00
Total estimado de hardware		625,00

O valor total estimado de hardware do protótipo é, portanto, da ordem de R\$ 625,00, incluindo a unidade de controle baseada em ESP32, o sistema de aquecimento com placa MK2B, o conjunto de ventilação, o mecanismo de rotação e a estrutura física com isolamento térmico. Não são considerados neste montante custos de mão de obra, ferramentas, desenvolvimento de software, testes ou retrabalho mecânico. Em cenário de produção seriada, é razoável esperar redução de custo por unidade em função de compra em volume e otimização da lista de materiais.

4.1.6.2 Estimativas para ampliação e aumento da capacidade

O protótipo foi dimensionado inicialmente para um conjunto reduzido de ovos, empregando uma bandeja impressa em 3D e um volume interno compatível com a placa de aquecimento MK2B utilizada. A arquitetura do sistema, entretanto, permite a expansão da capacidade por meio da adição de novos módulos térmicos e mecânicos, mantendo a mesma unidade de controle, algoritmos de operação e interface homem-máquina.

Para fins de análise de escalabilidade, considera-se um cenário em que a chocadeira é organizada em módulos térmicos equivalentes, cada um responsável por aproximadamente 60 ovos. Mantendo essa granularidade, a Tabela 4.2 ilustra um dimensionamento simplificado do custo em função da capacidade total.

Tabela 4.2 – Estimativa de custo de hardware em função da capacidade realista de ovos.

Capacidade	Placas MK2B	Custo aprox. (R\$)	Custo/ovo (R\$)
6 ovos	1	625,00	101,66
12 ovos	1	650,00	54,16
18 ovos	1	690,00	38,33
24 ovos	2	900,00	37,50
30 ovos	2	940,00	31,33
36 ovos	2	980,00	27,22

Observa-se que o custo por ovo diminui com o aumento da capacidade total, em virtude da diluição dos custos fixos (unidade de controle, interface, projeto mecânico e montagem) sobre um número maior de ovos incubados. Em um cenário industrial, com produção em série e compra de componentes em grande quantidade, é provável que esses valores sejam ainda menores, tanto pela negociação de preços quanto pelo refinamento da arquitetura (como a integração de fontes na própria placa principal e a racionalização de conectores e chicotes).

A ampliação de capacidade, contudo, não se restringe à simples replicação de módulos. Aumentos significativos de volume exigem reavaliação do projeto térmico (potência instalada, distribuição de fluxo de ar, posicionamento de sensores) e do sistema de umidificação, de forma a preservar a estabilidade do controle PID e a homogeneidade das condições ambientais em todos os níveis de bandejas, mantendo a taxa de eclosão observada no protótipo.

4.1.7 Limitações e observações

Apesar do bom desempenho funcional, o protótipo apresenta limitações relacionadas à sua configuração modular. O uso de módulos individuais simplificou o processo de desenvolvimento e testes, mas resultou em um volume físico maior e maior complexidade

de cabeamento. Recomenda-se, como continuidade do trabalho, o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCI) dedicada, visando reduzir o tamanho do conjunto, melhorar a dissipação térmica e aumentar a robustez do sistema em operação prolongada.

Capítulo 5

Conclusão

O protótipo da chocadeira automatizada multiespécies com controle PID e interface integrada, desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso, constitui uma versão funcional e didática, comprovando a viabilidade do controle de incubação com precisão térmica e de umidade para diferentes grupos de ovos, incluindo aves domésticas e espécies silvestres.

O desenvolvimento da chocadeira automatizada demonstrou a viabilidade da aplicação de técnicas de automação e controle em sistemas biológicos sensíveis, em que pequenas variações de temperatura e umidade podem comprometer o sucesso da incubação. O projeto integrou fundamentos de engenharia de controle, eletrônica embarcada e biotecnologia, resultando em um sistema funcional, preciso e adaptável a diferentes espécies.

Os resultados experimentais evidenciaram que o controle térmico e higrométrico se manteve dentro das faixas recomendadas pela literatura especializada [1, 6, 7], assegurando condições ideais para o desenvolvimento embrionário e a eclosão. A estrutura modular implementada facilitou a calibração dos parâmetros de operação e a validação individual das rotinas de controle, confirmando a consistência do projeto em nível de hardware e de software.

A utilização do controlador PID proporcionou estabilidade térmica adequada e resposta eficiente diante de perturbações externas, enquanto o controle de umidade baseado em histerese apresentou desempenho satisfatório e baixo consumo energético. A interface, composta por teclado matricial, encoder rotativo e display gráfico, demonstrou ergonomia e eficiência, permitindo interação direta e intuitiva, sem a necessidade de dispositivos externos de processamento.

A implementação atual já contempla perfis específicos de incubação e eclosão para répteis e aves de variados portes, demonstrando a versatilidade do sistema desenvolvido. Ainda assim, há oportunidades de aprimoramento para aumentar a confiabilidade, a autonomia e a integração tecnológica do projeto, tanto no hardware quanto no software. Alguns dos trabalhos futuros identificados são os seguintes:

- **Miniaturização e integração de hardware**

O sistema atual utiliza módulos independentes como o sensor DHT22, relés, display, teclado e microcontrolador ESP32, o que se mostrou adequado para a fase de desenvolvimento e validação funcional. Como evolução, propõe-se a criação de uma **placa de circuito impresso (PCI)** dedicada, integrando todos os componentes em uma estrutura compacta e estável. Essa modificação permitirá reduzir ruídos elétricos, otimizar o consumo energético, aumentar a robustez das conexões e diminuir o volume físico do dispositivo.

- **Expansão para monitoramento remoto**

Apesar de o controle atual operar de forma totalmente local, uma etapa de aprimoramento prevê a adição de monitoramento remoto por meio de conectividade Wi-Fi, aproveitando os recursos nativos do ESP32. O sistema poderá enviar dados em tempo real utilizando o protocolo MQTT ou um servidor web integrado, permitindo ao usuário acompanhar temperatura, umidade e o progresso do processo via aplicativo ou navegador. Essa funcionalidade transformaria a chocadeira em um sistema de supervisão e controle à distância, análogo a uma aplicação SCADA simplificada.

- **Análise de desempenho comparativo**

Para consolidar a avaliação técnica do sistema, propõe-se a realização de testes comparativos com chocadeiras comerciais, visando quantificar:

- o tempo de aquecimento até o regime térmico estável;
- a estabilidade de temperatura e umidade sob perturbações externas;
- a taxa média de eclodibilidade entre diferentes espécies.

Tais resultados permitirão validar experimentalmente a eficácia do controlador PID e do sistema de controle de umidade desenvolvido.

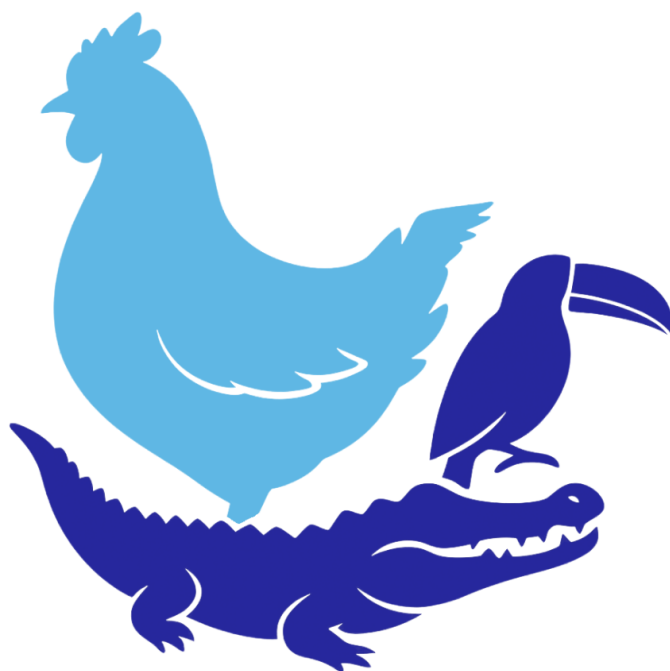
Com a adoção futura destas melhorias, o sistema poderá evoluir de um protótipo acadêmico para uma solução tecnicamente viável em contextos de pesquisa e produção. O projeto, portanto, representa uma contribuição significativa para a área de Engenharia de Computação aplicada à automação de processos biológicos, destacando-se como ferramenta didática e como base tecnológica para o desenvolvimento de sistemas autônomos de incubação controlada.

Referências Bibliográficas

- [1] AGROMISA FOUNDATION. *AGRODOK 34: Melhoria da incubação de ovos e criação de pintos*. Wageningen: Agromisa Foundation, 2004.
- [2] MENEZES, A. C.; et al. Influence of temperature and humidity manipulation on chicken embryonic development. *BMC Veterinary Research*, v. 10, Art. 234, 2014. DOI: 10.1186/s12917-014-0234-3.
- [3] DEEMING, D. C. *Avian Incubation: Behaviour, Environment and Evolution*. Oxford: Oxford University Press, 2002.
- [4] ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transactions of the ASME*, v. 64, p. 759-768, 1942.
- [5] DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 13. ed. São Paulo: Pearson, 2017.
- [6] BRASIL. EMBRAPA. *Incubação e manejo de pintos de corte*. Brasília: Embrapa Aves e Suínos, 2019.
- [7] COBB-VANTRESS. *Guia de Incubação Cobb 500*. Arkansas, EUA, 2008.
- [8] OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2019.
- [9] HOROWITZ, P.; HILL, W. *The Art of Electronics*. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [10] SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletrônica*. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2017.

Apêndice A

Manual de operação



CHOCADIRA AUTOMATIZADA

Manual de Operação

Sistema baseado em ESP32, ST7735, DHT22, relés, encoder KY-040 e teclado matricial 4x4, com controle PID, ciclos automáticos e retomada inteligente após quedas de energia.

Campo Grande – MS
December 9, 2025

Contents

1	Apresentação Geral	2
2	Interface do Usuário	2
2.1	Teclado 4x4	2
2.2	Encoder KY-040	3
2.3	Display TFT ST7735	3
3	Modo Automático por Espécie	4
3.1	Fluxo de utilização	4
3.2	Parâmetros controlados automaticamente	4
4	Espécies Pré-Configuradas	5
4.1	Espécies disponíveis e expansão	5
5	Modo Manual	8
5.1	Parâmetros disponíveis	8
5.2	Durante o ciclo	9
6	Retomada Automática após Queda de Energia	10
7	Finalização do Processo	10

1 Apresentação Geral

A Chocadeira Automatizada Multiespécies foi desenvolvida com o propósito de oferecer um ambiente de incubação altamente estável, preciso e independente, capaz de atender às necessidades térmicas, hídricas e comportamentais de diferentes espécies de aves e répteis. Seu funcionamento combina algoritmos de controle modernos, monitoramento contínuo e componentes eletrônicos de alto desempenho, resultando em um sistema confiável tanto para uso científico quanto educacional e doméstico.

A chocadeira realiza leituras constantes dos sensores de temperatura e umidade, ajustando automaticamente os atuadores responsáveis pelo aquecimento, umidificação e rotação dos ovos. Esses ajustes acontecem em tempo real, garantindo que o ambiente interno permaneça dentro dos parâmetros ideais ao longo de todo o ciclo de incubação e eclosão.

Outro diferencial importante é a capacidade de retomada automática após quedas de energia. O sistema registra periodicamente o estado da chocagem, permitindo que o processo continue exatamente do ponto em que foi interrompido, sem necessidade de reinitialização manual.

Além disso, sua interface intuitiva torna a interação simples e direta, permitindo que usuários iniciantes ou avançados configurem rapidamente modos automáticos por espécie ou personalizem parâmetros manualmente.

Missão do Sistema

Entregar um ambiente de incubação controlado, preciso e confiável para múltiplas espécies, por meio de tecnologia acessível e automação inteligente. O sistema integra controle PID, histerese de umidade, rotação periódica e proteção contra falhas, assegurando estabilidade ambiental e maximização da taxa de eclosão.

2 Interface do Usuário

A interface do sistema foi projetada para ser objetiva, responsiva e de fácil aprendizado, permitindo que o operador configure parâmetros, acompanhe leituras em tempo real e tome decisões rapidamente. Ela é composta por três elementos principais: o teclado matricial 4x4, o encoder rotativo KY-040 e o display TFT ST7735.

2.1 Teclado 4x4

O teclado matricial 4x4 é o principal meio de navegação e seleção de opções. Cada tecla executa uma função direta, reduzindo a quantidade de telas intermediárias e agilizando o fluxo de operação.

- * — Retorna imediatamente ao menu inicial, cancelando qualquer seleção em andamento.
- 0 — Acessa o **Modo Manual**, permitindo configuração completa dos parâmetros.
- 1–9, A–C — Selecionam espécies pré-configuradas no **Modo Automático**.
- # — Confirma a escolha e **inicia** o processo de incubação ou eclosão.
- D — Finaliza a ciclagem atual e retorna ao menu inicial, encerrando todos os atuadores.

Essas funções foram escolhidas para criar uma navegação intuitiva, em que cada tecla possui um propósito claro e imediato, reduzindo erros e tempo de operação.

2.2 Encoder KY-040

O encoder KY-040 é utilizado para ajustes finos e seleção de valores numéricos. Girar o encoder altera o valor em destaque na tela, enquanto pressioná-lo efetiva a confirmação do parâmetro mostrado. Seu uso é predominante no **Modo Manual**, oferecendo precisão durante a configuração dos valores de temperatura, umidade e tempos de incubação.

2.3 Display TFT ST7735

O display colorido TFT ST7735 funciona como o centro de informações do sistema, exibindo de forma clara e organizada todos os dados relevantes à operação.

Ele apresenta:

- **Menus** — opções de modo, seleção de espécies e confirmações.
- **Espécie selecionada** — nome da espécie em modo automático.
- **Fase atual** — indicação entre *incubação* ou *eclosão*.
- **Temperatura e umidade** — leituras em tempo real do sensor DHT22.
- **Tempo decorrido** — contagem precisa em dias, horas, minutos e segundos.

O layout das telas foi organizado para garantir boa legibilidade e rápida interpretação durante todo o ciclo, inclusive em ambientes com baixa luminosidade.

3 Modo Automático por Espécie

O **Modo Automático por Espécie** é a forma mais prática e segura de usar a chocadeira no dia a dia. Nele, o usuário apenas escolhe a espécie desejada e o sistema assume o controle de todos os parâmetros de incubação e eclosão, com base em valores previamente ajustados no código.

Esse modo é indicado para a maioria dos usos, pois reduz erros de configuração, padroniza os resultados e facilita a operação mesmo para usuários com pouca experiência em incubação artificial.

3.1 Fluxo de utilização

Para utilizar o Modo Automático, siga a sequência abaixo:

1. No **menu inicial**, pressione a tecla * para entrar na seleção de espécies.
2. Observe no display a instrução para escolher a espécie.
3. Pressione uma das teclas **1–9, A, B ou C** correspondente à espécie desejada.
4. Verifique no display o **nome da espécie** selecionada.
5. Confirme o início do processo pressionando a tecla #.

A partir desse momento, a chocadeira entra automaticamente na fase de **incubação** utilizando os parâmetros pré-definidos para a espécie selecionada. A passagem para a fase de **eclosão** também é feita automaticamente, ao final do período de incubação configurado.

3.2 Parâmetros controlados automaticamente

Ao escolher uma espécie, o sistema carrega internamente um conjunto de parâmetros específicos, que passam a ser gerenciados sem intervenção do usuário:

- **Temperaturas ideais** para incubação e eclosão, com ajuste dinâmico via controle PID, evitando variações bruscas.
- **Faixas de umidade mínima e máxima**, com acionamento e desligamento automático do umidificador conforme a leitura do sensor.
- **Dias de incubação** até a transição para a fase de eclosão.
- **Dias de eclosão**, durante os quais o sistema mantém condições favoráveis ao nascimento dos filhotes.

- **Rotação automática dos ovos**, com giros programados e distribuídos ao longo do dia, respeitando um atraso inicial e intervalos fixos entre rotações.

Durante todo o processo, o display informa a fase atual, a espécie em uso, as leituras de temperatura e umidade e o tempo total decorrido, permitindo que o operador acompanhe a evolução da chocagem em tempo real.

4 Espécies Pré-Configuradas

4.1 Espécies disponíveis e expansão

Galinha — Tecla 1



T incubação: 37.7 °C
Umidade: 55–60%
Dias incubação: 18
T eclosão: 37.2 °C
Umidade eclosão: 65–75%
Dias eclosão: 3
Rotação: Cada 6 h

Pato — Tecla 2



T incubação: 37.5 °C
Umidade: 55–60%
Dias incubação: 25
T eclosão: 37.0 °C
Umidade eclosão: 70–80%
Dias eclosão: 3
Rotação: Cada 6 h

Codorna — Tecla 3



T incubação: 37.7 °C
Umidade: 55–60%
Dias incubação: 14
T eclosão: 37.2 °C
Umidade eclosão: 65–75%
Dias eclosão: 2
Rotação: Cada 6 h

Peru — Tecla 4



T incubação: 37.5 °C
Umidade: 55–65%
Dias incubação: 25
T eclosão: 37.0 °C
Umidade eclosão: 70–80%
Dias eclosão: 3
Rotação: Cada 6 h

Avestruz — Tecla 5



T incubação: 36.1 °C
Umidade: 25–35%
Dias incubação: 42
T eclosão: 35.5 °C
Umidade eclosão: 40–50%
Dias eclosão: 3–4
Rotação: Cada 3 h

Ganso — Tecla 6



Dias incubação: 30
Dias eclosão: 3
T incubação: 37.3 °C
Umidade incubação: 50–60%
T eclosão: 37.0 °C
Umidade eclosão: 65–75%
Rotação: Cada 6 h

Pombo — Tecla 7



Dias incubação: 17
Dias eclosão: 3
T incubação: 37.5 °C
Umidade incubação: 50–60%
T eclosão: 37.0 °C
Umidade eclosão: 70–80%
Rotação: Cada 6 h

Canário — Tecla 8



Dias incubação: 14
Dias eclosão: 2
T incubação: 37.7 °C
Umidade incubação: 55–65%
T eclosão: 37.2 °C
Umidade eclosão: 60–70%
Rotação: Cada 6 h

Marreco — Tecla 9



T incubação: 37.5 °C
Umidade: 55–60%
Dias incubação: 26
T eclosão: 37.0 °C
Umidade eclosão: 75–80%
Dias eclosão: 3
Rotação: Cada 6 h

Arara — Tecla A



T incubação: 37.2 °C
Umidade: 45–55%
Dias incubação: 26
T eclosão: 36.8 °C
Umidade eclosão: 65–75%
Dias eclosão: 2–3
Rotação: Cada 6 h

Jacaré — Tecla B



T incubação: 31.5–33 °C
Umidade: 85–95%
Dias incubação: 60–70
T eclosão: 30–32 °C
Umidade eclosão: 95%
Dias eclosão: 2–3
Rotação: Não aplicável

Tartaruga — Tecla C



T incubação: 28–31 °C
Umidade: 70–80%
Dias incubação: 55–80
T eclosão: Igual
Umidade eclosão: 80–90%
Dias eclosão: 2–3
Rotação: Não aplicável

Ovoscopia

A ovoscopia é o processo de inspeção dos ovos por meio de uma fonte de luz, permitindo visualizar a formação embrionária e identificar possíveis anomalias. Ela auxilia na detecção de ovos inférteis, desenvolvimento interrompido e posicionamento inadequado do embrião, aumentando a taxa de eclosão. Recomenda-se realizar o procedimento em ambiente escuro e com movimentos rápidos para evitar perda de calor.

5 Modo Manual

O **Modo Manual** oferece controle total sobre todos os parâmetros da incubação e eclosão, permitindo que o usuário ajuste cuidadosamente cada variável conforme a necessidade de espécies não cadastradas, testes experimentais ou calibrações avançadas.

Esse modo utiliza o **encoder KY-040** para definir valores com precisão decimal (quando necessário), confirmando cada parâmetro ao pressionar o botão do próprio encoder.

Quando usar o Modo Manual?

- Para espécies que não existem na lista automática;
- Para testes laboratoriais ou ajustes finos de temperatura/umidade;
- Para estudar efeitos de novas faixas ambientais nos ovos;
- Para calibrar sensores ou validar a estabilidade do sistema.

5.1 Parâmetros disponíveis

No modo manual, o usuário define todos os parâmetros essenciais do ciclo:

- **Temperatura de incubação (°C);**
- **Umidade mínima e máxima** para incubação;

- **Dias totais da fase de incubação;**
- **Temperatura de eclosão (°C);**
- **Umidade mínima e máxima** para eclosão;
- **Dias totais da fase de eclosão.**

Cada valor aparece destacado no display, sendo modificado girando o encoder. Ao pressionar o encoder, o valor atual é **confirmado** e o sistema avança para o próximo parâmetro.

Fluxo da configuração manual

1. Entrar no modo manual pressionando a tecla **0** no menu inicial.
2. Ajustar os parâmetros da **fase de incubação**:
 - Temperatura;
 - Umidade mínima;
 - Umidade máxima;
 - Dias de incubação.
3. Ajustar os parâmetros da **fase de eclosão**:
 - Temperatura;
 - Umidade mínima;
 - Umidade máxima;
 - Dias de eclosão.
4. Ao final, o sistema exibirá:

"Configuração concluída — pressione # para iniciar"

5. Pressionar # inicia o ciclo manual.

5.2 Durante o ciclo

Depois de iniciado, o ciclo manual segue automaticamente todas as regras da espécie configurada pelo usuário:

- Controle **PID** completo para manter a temperatura desejada;
- Controle de umidade baseado em **histerese**;
- **Rotação automática** dos ovos a cada 6 horas;
- Transição automática da incubação para eclosão conforme os dias definidos;

- Atualização constante no display com:
 - Temperatura medida;
 - Umidade medida;
 - Fase atual;
 - Tempo decorrido.

6 Retomada Automática após Queda de Energia

O sistema salva periodicamente o tempo decorrido, fase atual e parâmetros. Ao religar, retoma exatamente onde parou.

7 Finalização do Processo

Ao término dos dias de eclosão configurados, tanto para o **modo manual** quanto para as **pré-configuradas**:

- o aquecimento é desligado;
- o umidificador é desligado;
- a rotação é desativada;
- o sistema informa no display que a rotina foi concluída.

O usuário deve pressionar a tecla **D** para retornar ao menu inicial.

Agradecimento ao Usuário

Agradecemos por utilizar a Chocadeira Automatizada. Esperamos que este sistema contribua para ciclos de incubação mais estáveis, seguros e eficientes, permitindo que você obtenha os melhores resultados possíveis com praticidade e confiabilidade.

Este manual foi elaborado para guiá-lo em todas as etapas de operação, desde a escolha da espécie até a finalização do processo. Caso surjam dúvidas, ajustes ou interesse em expandir o sistema, recomendamos consultar a documentação técnica complementar ou realizar novas calibrações conforme necessário.

Desejamos sucesso em suas incubações e agradecemos por confiar nesta tecnologia.

