

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE EDUCAÇÃO PRESENCIAL E A
DISTÂNCIA - UNIFEITEP**

ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

BRUNO VICENTE BORELI



**APLICAÇÃO DE SISTEMAS EMBARCADOS NO CONTROLE DE
INCUBADORAS: INTERFACE INTERATIVA E CONFIGURAÇÃO
FLEXÍVEL DE PARÂMETROS AMBIENTAIS E MECÂNICOS**

Unifeitep
Centro Universitário

**MARINGÁ
2025**

BRUNO VICENTE BORELI

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS EMBARCADOS NO CONTROLE DE
INCUBADORAS: INTERFACE INTERATIVA E CONFIGURAÇÃO
FLEXÍVEL DE PARÂMETROS AMBIENTAIS E MECÂNICOS**



Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
UNIFEITEP – Centro Universitário de Educação
Presencial e à Distância, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia da Computação

Orientador: Me. Tiago Terra

Unifeitep
Centro Universitário

MARINGÁ
2025

UNIFEITEP – UNIVERSIDADE DE EDUCAÇÃO PRESENCIAL E À DISTÂNCIA

BRUNO VICENTE BORELI

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS EMBARCADOS NO CONTROLE DE
INCUBADORAS: INTERFACE INTERATIVA E CONFIGURAÇÃO FLEXÍVEL DE
PARÂMETROS AMBIENTAIS E MECÂNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
UNIFEITEP – Centro Universitário de Educação
Presencial e à Distância, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia da Computação

Orientador: Me. Tiago Terra

BANCA EXAMINADORA



Professor Orientador:

Professor: - FEITEP

Professor: - FEITEP

Data de Aprovação: _____ de _____ de 2025.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, e à minha família e amigos que permaneceram ao meu lado durante todo este percurso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança para superar todos os desafios ao longo desta jornada acadêmica. Sem a sua presença constante em minha vida, este trabalho não teria sido possível.

À minha família, expresso minha mais profunda gratidão. Em especial ao meu pai, Claudemir Boreli, e à minha mãe, Rosana Aparecida Vicente Boreli, que estiveram ao meu lado em todos os momentos do curso. Agradeço por cada conselho, cada gesto de carinho e por acreditarem em mim nos momentos em que eu mais precisei.

Por fim, agradeço ao meu orientador, Me. Tiago Terra, aos professores João Karlos e Sérgio Carlos da Silva, bem como a todos os demais docentes e colegas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada um de vocês deixou uma marca significativa na minha formação e na construção deste projeto.

"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes."

Isaac Newton (1685)

RESUMO

As variações e a falta de precisão nos parâmetros de temperatura e umidade durante a incubação podem comprometer significativamente a taxa de eclosão e a qualidade dos pintainhos. Nesse contexto, o uso de tecnologias, como sistemas de automação para o controle ambiental, torna-se essencial para garantir melhores resultados no processo de incubação. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um protótipo de chocadeira automatizada, dotado de uma interface interativa que permite o ajuste de parâmetros ambientais e mecânicos. A proposta visa aprimorar a qualidade do processo e simular, de forma controlada, as condições ideais para a incubação de ovos. A estrutura física da chocadeira foi confeccionada em madeira MDF e é composta pelos seguintes módulos: aquecimento, umidade, plataforma de viragem dos ovos, câmara de incubação, compartimento de umidificação e espaço reservado à lógica de controle. Toda a automação do sistema foi implementada por meio do microcontrolador ESP32, responsável por comandar sensores, atuadores, módulos eletrônicos e demais componentes integrados ao protótipo. A interface do usuário foi programada na plataforma Arduino IDE e resultou em uma aplicação intuitiva, que permite o ajuste dos parâmetros ambientais e das funções mecânicas do sistema em qualquer fase do processo de incubação. O módulo de aquecimento utiliza controle PID, possibilitando o ajuste dinâmico da temperatura conforme as variações ambientais e mantendo-a estável no valor previamente definido. O módulo de umidade, por sua vez, opera com relés e evaporadores ultrassônicos, sendo capaz de manter níveis de umidade de até 60% no interior da câmara de incubação. A plataforma de viragem dos ovos permite a configuração eletrônica do tempo e do ângulo de rotação, o que evita que os embriões grudem na casca e comprometam o desenvolvimento. A incubação foi realizada com ovos de galinha caipira, respeitando os parâmetros recomendados de temperatura, umidade e periodicidade de viragem. Conclui-se que a solução desenvolvida neste trabalho se apresenta eficiente na correção e no controle em tempo real dos parâmetros ambientais durante a incubação, contribuindo para a estabilidade do processo e garantindo que a chocagem ocorra dentro dos limites configurados previamente.

Palavras-chave: Chocadeira. Microcontrolador. PID. Sensoriamento. Umidade.

ABSTRACT

The variations and the lack of precision in temperature and humidity parameters during the incubation can significantly compromise the hatching rate and the quality of the chicks. In this context, the use of technologies, such as systems of automation for the environmental control, becomes essential to ensure better results in the incubation process. This work aims to develop a prototype of an automated incubator, equipped with an interactive interface that allows the adjustment of environmental and mechanical parameters. The proposal seeks to enhance the quality of the process and simulate, in a controlled manner, the ideal conditions for the incubation of eggs. The physical structure of the incubator was constructed of MDF wood and it's composed of the following modules: heating, humidity, egg turning platform, incubation chamber, humidification compartment, and a space reserved for the control logic. All the automation system was implemented through the use of the ESP32 microcontroller, which is responsible to controll sensors, actuators, electronic modules, and other components integrated into the prototype. The user's interface was programmed into the Arduino IDE platform and it resulted in an intuitive application, allowing the adjustment of environmental parameters and mechanical functions of the system at any stage of the incubation process. The module of the heating uses PID control, enabling the dynamic temperature adjustment according to the environmental variations and keeping it stable at the previously defined value. In turn, the module of the humidity operates with relays and ultrasonic evaporators, being able to maintain levels of humidity up to 60% inside the incubation chamber. The egg turning platform allows electronic configuration of the time and angle of rotation, which prevents the embryos sticking to the shell and compromising the development. The incubation was carried out with free-range chicken eggs, respecting the recommended parameters of temperature, humidity, and turning frequency. It is concluded that the solution developed in this work is efficient in the correction and real-time control of environmental parameters during incubation, contributing to the stability of the process and ensuring that the incubation occurs within the previously configured limits.

Key words: Incubator. Microcontroller. PID. Sensing. Humidity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. OBJETIVOS.....	18
1.1.1. Objetivo geral.....	18
1.1.2. Objetivos específicos	18
2. PROCESSO DE CHOCAGEM	19
2.1. ESTRUTURA DOS OVOS.....	19
2.1.1. Seleção dos ovos para incubação	20
2.2. INCUBAÇÃO DOS OVOS	22
2.2.1. Temperatura	23
2.2.2. Umidade.....	24
2.2.3. Viragem dos Ovos	25
2.2.4. Ventilação.....	25
2.3. MANUSEIO NA HORA DA INCUBAÇÃO	26
2.4. DESENVOLVIMENTO EMBRIONÁRIO.....	27
2.5. ECLOSÃO	29
3. CONTROLADORES	30
3.1. CONTROLE ON/OFF	30
3.2. SURGIMENTO E EVOLUÇÃO DO CONTROLE PID	32
3.3. MALHAS DE CONTROLE	33
3.3.1. Sistema de Malha Aberta	33
3.3.2. Sistemas de Malha Fechada	34
3.4. CONTROLE PROPORCIONAL	35
3.5. CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL	36
3.6. CONTROLE PROPORCIONAL DERIVATIVO	38
3.7. CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO.....	40
3.7.1. Critérios para escolha do Controlador	41
3.8. SINTONIA DE CONTROLADORES PID	42
3.8.1. Sintonia pelo método de Tentativa e Erro	42
3.8.2. Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols	43
3.8.3. Sintonia com base no método de Cohen-Coon (CC).....	46

4. COMPONENTES ELETRÔNICOS.....	48
4.1. SENsoRES	48
4.1.1. Sensores Analógicos	48
4.1.2. Sensores Digitais.....	49
4.1.3. Sensor DHT22	50
4.2. ATUADORES	52
4.2.1. Relés	52
4.2.2. Servo Motor.....	53
4.3. FONTES DE ALIMENTAÇÃO.....	55
4.3.1. Fontes AC/DC.....	55
4.3.2. Conversor Step-Down	56
4.4. MICROCONTROLADORES	56
4.4.1. Surgimento e Características dos Microcontroladores.....	57
4.4.2. Diferença entre Microcontrolador e Controlador	57
4.4.3. Comparação entre os principais microcontroladores	58
5. MATERIAIS E MÉTODOS	63
5.1. DEFINIÇÃO DO TIPO DE PESQUISA	63
5.2. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	64
5.3. CONSTRUÇÃO DA INCUBADORA	65
5.3.1. Parte Frontal.....	66
5.3.2. Parte Superior	68
5.3.3. Parte Direita.....	69
5.3.4. Parte Esquerda	70
5.3.5. Parte Traseira.....	71
5.3.6. Câmara de Ambiente	72
5.3.7. Parte Inferior da Câmara de Incubação	73
5.3.8. Compartimento do Umidificador	74
5.4. MÓDULOS DA INCUBADORA.....	75
5.4.1. Módulo de Aquecimento	75
5.4.2. Módulo de Movimentação da Plataforma	77
5.4.3. Módulo de Umidade.....	78
5.4.4. Controle do Módulo de Umidade.....	81
5.5. CONEXÕES ELÉTRICAS e LÓGICA DE CONTROLE	82

5.5.1.	Microcontrolador ESP32	83
5.5.2.	Programação do ESP32	85
5.5.3.	Sintonia do Controle PID.....	86
5.6.	FONTES DE ALIMENTAÇÃO.....	86
5.7.	INTERFACE DE USUÁRIO	88
5.7.1.	Pré-Configuração para Choca de Ovos de Galinha	90
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
7.	CONCLUSÃO	102
	REFERÊNCIAS.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura do ovo	19
Figura 2- Desenvolvimento do embrião de pintainho	28
Figura 3- Tamanho da câmara de ar pelo tempo de incubação	28
Figura 4- Diagrama de Blocos Controle On/Off	31
Figura 5- Trocador de Calor em malha aberta.....	33
Figura 6- Trocador de calor em malha fechada.....	34
Figura 7- Diagrama de blocos do trocador de calor em malha fechada	35
Figura 8- Diagrama de Blocos Controle Proporcional	36
Figura 9- Diagrama de Blocos Controle Proporcional Integral	37
Figura 10- Controle Proporcional comparado ao Controle Proporcional Integral	38
Figura 11- Diagrama de Blocos Controle Proporcional Derivativo.....	39
Figura 12- Comparação da resposta dos controladores P e PD	39
Figura 13- Diagrama de Blocos Controle PID.....	40
Figura 14- Parâmetros e curva de resposta ao degrau	44
Figura 15- Oscilação Crítica	45
Figura 16- Ilustração do sinal de saída de um sensor analógico.....	49
Figura 17- Ilustração do sinal de saída de um conversor analógico digital	50
Figura 18- Descrição dos pinos do sensor DHT22	51
Figura 19- Construção do relé	53
Figura 20- Componentes internos do Servo Motor.....	54
Figura 21- Módulo Step-Down.....	56
Figura 22- Diagrama de pinos do Arduino Uno	59
Figura 23- Construção do ESP32	60
Figura 24- Características gerais da Raspberry Pi.....	62
Figura 25- Fluxograma do projeto	65
Figura 26- Visão Frontal da Chocadeira	67
Figura 27- Visão Superior da Chocadeira	68
Figura 28- Visão Superior Interna da Chocadeira	68
Figura 29- Lateral Direita da Chocadeira.....	69
Figura 30- Visão Lateral Esquerda da Chocadeira	70
Figura 31- Parte Traseira da Chocadeira	71

Figura 32- Visão Interna da Câmara de Incubação	72
Figura 33- Parte Inferior da Câmara de Incubação	73
Figura 34- Compartimento Interno Traseiro da Chocadeira	74
Figura 35- Módulo de Aquecimento.....	75
Figura 36- Ligações do Módulo <i>AC Dimmer</i>	76
Figura 37- Estrutura da Plataforma de Ovos	77
Figura 38- Fixação do Servo Motor	78
Figura 39- Recipiente dos Evaporadores Ultrassônicos	79
Figura 40- Módulo de Controle dos Evaporadores Ultrassônicos.....	79
Figura 41- Tanque D'Água com Bomba e Filtro	80
Figura 42- Sistema de Umidade por Completo.....	81
Figura 43- Construção e Conexões do Módulo Relé	82
Figura 44- Conexões do Esp32	83
Figura 45- Fontes de Alimentação.....	87
Figura 46- Regulador de Tensão <i>Step-Down</i>	87
Figura 47- Bateria da Chocadeira.....	88
Figura 48- Diagrama de Blocos simplificado da Interface da Chocadeira	89
Figura 49- Tela de Menu Principal.....	91
Figura 50- Tela de Nova Chocagem.....	92
Figura 51- Tela de Monitoramento	93
Figura 52- Tela de Opções	94
Figura 53- Tela de Perfis	95
Figura 54- Tela de erros	96
Figura 55- Configuração final dos parâmetros PID da Chocadeira	96
Figura 56- Gráfico do Controle PID de Temperatura.....	97
Figura 57- Umidade máxima obtida com os evaporadores ultrassônicos	98
Figura 58- Resultado da Ovoscopia	99
Figura 59- Pintainhos no berçário após o nascimento.....	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Classificação dos ovos	21
Quadro 2- Efeitos dos Modos P, I e D na Resposta em Malha Fechada	41
Quadro 3- Fluxo de Ajuste do controlador por tentativa e erro	43
Quadro 4- Especificações do sensor.....	51
Quadro 5- Vantagens do ESP32 em relação ao Arduino Uno.....	61
Quadro 6- Conexões do microcontrolador com os módulos e componentes eletrônicos	84
Quadro 7- Funções dos Botões.....	89
Quadro 8- Parâmetros utilizados para a incubação de ovos de galinha.....	90

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIASÕES

ME	<i>Mestre</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
P	<i>Proporcional</i>
PI	<i>Proporcional-Integral</i>
PD	<i>Proporcional-Derivativo</i>
PID	<i>Proporcional-Integral-Derivativo</i>
EUA	<i>United States of America</i>
CLP	<i>Controlador Lógico Programável</i>
SCADA/DCS	<i>Sistemas de Controle Distribuído</i>
CDD	<i>Controle Digital Distribuído</i>
PV	<i>Variável de Processo</i>
SP	<i>Referência Desejada</i>
MV	<i>Variável Manipulada</i>
TT	<i>Transmissor de Temperatura</i>
TIC	<i>Indicador e Controlador de Temperatura</i>
KP	<i>Ganho Proporcional</i>
TI	<i>Tempo Integral</i>
TD	<i>Tempo Derivativo</i>
KI	<i>Ganho Integral</i>
KD	<i>Ganho Derivativo</i>
KU	<i>Ganho Crítico</i>
TU	<i>Período Crítico</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
AC	<i>Corrente Alternada</i>
DC	<i>Corrente Contínua</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CI	<i>Intregrated Circuit</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>

IOT	<i>Internet of Things</i>
MHz	<i>Mega Hertz</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
T1	<i>Tempo 1</i>
T2	<i>Tempo 2</i>
T.A.	<i>Temperatura Atual</i>
T.F.	<i>Temperatura Final</i>
U.A.	<i>Umidade Atual</i>
U.F.	<i>Umidade Final</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Manuseio na Incubação	27
Tabela 2- Método da Resposta ao Degrau	44
Tabela 3- Método da oscilação crítica	46
Tabela 4- Método de Cohen-Coon.....	47
Tabela 5- Tabela da posição do servo.....	54
Tabela 6- Componentes e suas respectivas voltagens.....	87
Tabela 7- Teste de Aquecimento com duração de 30 minutos.....	97
Tabela 8- Estatísticas da Incubação	99

1. INTRODUÇÃO

À medida que a criação de animais ovíparos se diversifica e se expande, aumenta-se também a necessidade de tecnologias capazes de garantir ambientes controlados e eficientes para a incubação de ovos. Muitos criatórios enfrentam dificuldades para assegurar o sucesso do processo de desenvolvimento embrionário, sobretudo quando se trata de espécies com exigências de ambiente específicas.

Na incubação de ovos, diversos problemas podem comprometer o sucesso do processo se as condições ambientais não forem rigorosamente controladas. Temperaturas mais altas do que o ideal podem acelerar o desenvolvimento embrionário, resultando em eclosão prematura ou morte do embrião, além de causar desidratação do ovo. Por outro lado, temperaturas abaixo do necessário retardam ou interrompem o desenvolvimento, levando a eclosão tardia ou falha total (*Viola et al.*, 2019). Umidade inadequada também é crítica: níveis baixos causam perda excessiva de água, desidratando o embrião e dificultando a eclosão (*Tona et al.*, 2013), enquanto níveis muito altos reduzem a perda de água, formando uma câmara de ar pequena que impede a respiração adequada do pintinho (*Petersime*, 2023). Além disso, a ausência de virada dos ovos pode fazer o embrião aderir à casca, causando desenvolvimento anormal, maior mortalidade embrionária e redução da taxa de eclosão (*El-Ashram*, 2020).

Os desafios de controle do ambiente na incubação de ovos podem ser resolvidos utilizando tecnologias como sensores, microcontroladores e sistemas automatizados de controle de temperatura, umidade e viragem. Sensores monitoram continuamente as condições, permitindo que microcontroladores ajustem a temperatura para evitar eclosões prematuras ou tardias e mantenham a umidade ideal para o desenvolvimento embrionário (*Boleli et al.*, 2016). Mecanismos automáticos de viragem previnem a aderência do embrião à casca, aumentando a taxa de eclosão (*Eil*, 2011). Essas soluções reduzem erros humanos e são viáveis para avicultura familiar e operações comerciais, promovendo eficiência e produtividade.

Utilizando-se de um sistema automatizado controlado por um microcontrolador central, sensores precisos e atuadores é possível simular o ambiente ideal para a incubação de ovos de diversas espécies ovíparas. Com essa tecnologia, os parâmetros ambientais (como umidade, temperatura, intervalo e ângulo de viragem

dos ovos), podem ser configurados de acordo com as exigências específicas de cada espécie, garantindo um ambiente controlado e otimizado para o desenvolvimento embrionário. Essa abordagem não apenas aumenta a taxa de eclosão ao manter condições consistentes, mas também simplifica o processo, reduzindo a dependência de intervenções manuais e minimizando erros operacionais. Além disso, a versatilidade do sistema permite sua aplicação em diferentes contextos, desde a avicultura familiar até pesquisas científicas.

Utilizando-se de sistemas avançados de controle, é possível simular o ambiente ideal para a incubação. O sistema de controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) ajusta continuamente a potência do aquecimento, mantendo a estabilidade térmica essencial para evitar falhas na eclosão. A umidade é regulada por um relé que ativa ventilador e umidificadores, assegurando níveis ideais de ambiente. Um servo motor inclina a plataforma de ovos em intervalos programáveis, prevenindo aderências do embrião à casca. Essa tecnologia, em conjunto com uma interface programável, permite configurar parâmetros respectivos para cada espécie. Em face disso temos por objetivo:

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Elaborar um protótipo de chocadeira automatizada, com interface interativa para ajuste de parâmetros ambientais e mecânicos, visando aprimorar a qualidade do processo e simular condições ideais para a incubação de ovos;

1.1.2. Objetivos específicos

- Implementar um sistema PID para controle de temperatura;
- Desenvolver o software da interface da chocadeira;
- Projetar um sistema de controle *on/off* para umidade;
- Construir plataforma de ovos controlada eletronicamente;
- Analisar os resultados pós-incubação utilizando ovos de galinha.

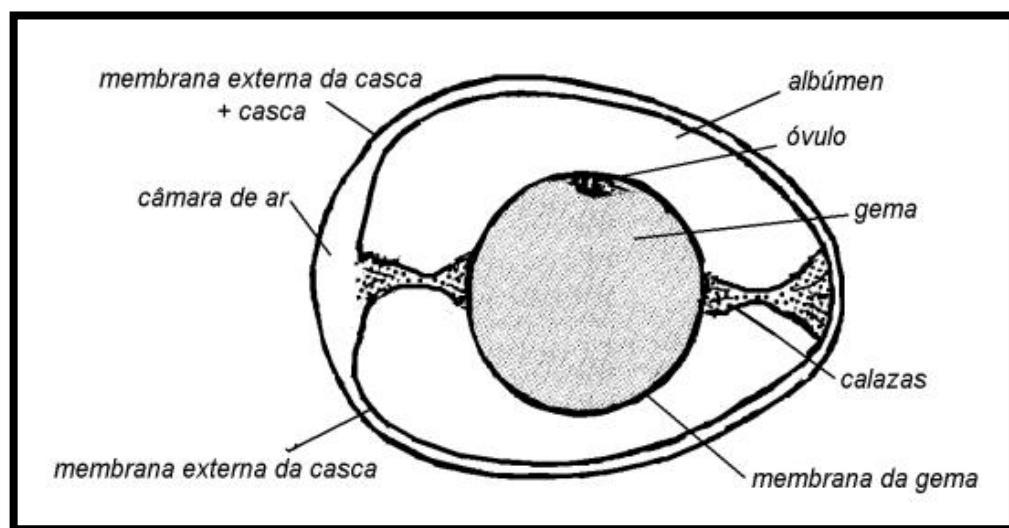
2. PROCESSO DE CHOCAGEM

A incubação e a chocagem de ovos de galinha envolvem processos e aspectos técnicos complexos, que demandam cuidados rigorosos e o cumprimento das normas sanitárias vigentes. Entre os elementos essenciais para o sucesso dessas etapas, destacam-se a adequada estrutura e seleção dos ovos, as práticas de pré-aquecimento e os procedimentos de incubação em equipamentos artificiais. Ademais, torna-se imprescindível compreender o desenvolvimento embrionário, adotar técnicas adequadas de manejo durante todo o ciclo e assegurar as condições ideais para a eclosão.

2.1. ESTRUTURA DOS OVOS

Segundo Kok (2011), o ovo é uma estrutura complexa que é constituída por: a casca (*conquilha*), as membranas da casca, a clara do ovo (*albúmen*), dois cordões torcidos (*calazas*), a gema e o óvulo (*gérmens*). O óvulo não fecundado é denominado oócito ou gameta feminino, enquanto o óvulo fertilizado é conhecido como blastoderma ou embrião, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1- Estrutura do ovo



Fonte: Kok (2011)

Os ovos apresentam diversos componentes distintos. A casca é uma camada calcária, dura e resistente, que protege o interior do ovo. Existem duas membranas dentro da casca, uma externa e outra interna, que se separam na extremidade mais arredondada, formando uma câmara de ar. À medida que ocorre a evaporação, essa câmara aumenta de tamanho, explicando por que ovos mais velhos flutuam na água, enquanto ovos frescos afundam (Kok, 2011).

Segundo Amaral (2016), a clara do ovo de galinha é constituída por aproximadamente 10,5% de proteínas e 88,5% de água, além de pequenas quantidades de gordura, riboflavina e outras vitaminas B. A gema, por sua vez, contém cerca de 16,5% de proteínas, 33% de gordura e 50% de água, além de lecitina, minerais como ferro e vitaminas lipossolúveis A, D, E e K. A composição nutricional da gema pode variar conforme a dieta fornecida às aves.

Em ovos mais velhos a clara é menos viscosa e, ao quebrá-los, seu conteúdo se espalha mais do que o de ovos frescos. Dois cordões de clara, conhecidos como calazas, mantêm a gema centralizada. A gema, que é amarela, varia de cor conforme a alimentação das galinhas. É na superfície da gema que se encontra o óvulo. O desenvolvimento do embrião começa quando o óvulo é fecundado. Tanto a gema quanto a clara são ricas em nutrientes, fornecendo proteínas e gorduras essenciais para o desenvolvimento do embrião e do pintainho recém-nascido, conforme observado por Kok (2011).

2.1.1. Seleção dos ovos para incubação

Para Kok (2011), com o propósito de garantir o sucesso na incubação, deve-se usar apenas ovos frescos, de preferência com até uma semana de produção e armazenados em um local fresco, com temperatura entre 16-20°C. Também é recomendável usar ovos de diferentes galinhas para reduzir o risco de perda, pois uma galinha pode produzir ovos menos férteis do que outras.

Além disso, Kok (2011) afirma que os melhores resultados de incubação são obtidos com ovos de tamanho normal, provenientes de boas poedeiras, que pesam

entre 30-70g. A seguir podemos ver o Quadro 1, que mostra a classificação dos ovos com base no Decreto nº 30.691/1952.

Grupo	I	Branco	Casca branca ou esbranquiçada
	II	De cor	Casca avermelhada
Classe	A		Casca limpa, íntegra sem deformação; câmara de ar fixa com até 4mm de altura; clara límpida, transparente, consistente; gema translúcida, central e consistente.
	B		Casca limpa, íntegra, discretas manchas e deformações; câmara de ar fixa com até 6mm de altura; clara límpida, transparente, relativamente consistente; gema consistente, translúcida, ligeiramente descentralizada.
	C		Casca limpa íntegra com defeitos de textura e manchas; câmara de ar solta com até 10mm de altura; clara com ligeira turvação e relativamente consistente; gema descentralizada sem rompimento.
Tipo	1	Extra	A partir de 60g por unidade
	2	Grande	A partir de 55g por unidade
	3	Médio	A partir de 50g por unidade
	4	Pequeno	A partir de 45g por unidade
Identidade	Frescos		Ovos que não forem conservados por qualquer processo.
	Ovo Integral	Resfriado	Produto obtido pelo ovo integral, devendo permanecer sob refrigeração.
		Congelado	Produto obtido pelo congelamento do ovo integral, devendo permanecer sob temperatura abaixo de -18°C
		Pasteurizado resfriado	Produto obtido pela pasteurização do ovo integral, devendo permanecer sob refrigeração.
		Pasteurizado congelado	Produto obtido pela pasteurização do ovo integral, devendo permanecer sob temperatura abaixo de -18°C
	Desidratado		Produto obtido pela desidratação do ovo integral pasteurizado.

Quadro 1 - Classificação dos ovos

Fonte: Amaral (2016)

Conforme alerta a *University of Missouri Extension* (2017), os ovos devem ser armazenados em ambiente fresco, com temperatura entre 7°C e 13°C e umidade relativa entre 70% e 75%. Não se recomenda o uso de refrigeradores domésticos, pois temperaturas muito baixas podem comprometer a taxa de eclosão. Para melhores resultados, os ovos devem ser incubados entre 3 e 4 dias após a postura, evitando-se o armazenamento por mais de duas semanas. Caso a armazenagem ultrapasse sete dias, recomenda-se inclinar os ovos periodicamente para evitar que o conteúdo fique aderido à casca. Além disso, mudanças rápidas ou flutuações de temperatura devem ser evitadas, pois podem causar o chamado “suor” nos ovos, favorecendo o crescimento microbiano.

Ovos que apresentam conformações irregulares (como formatos excessivamente alongados, arredondados, de pequeno porte ou malformados), devem ser descartados para fins de incubação, devido à baixa probabilidade de originarem pintinhos viáveis. Da mesma forma, ovos com gemas duplas ou com dimensões superiores ao padrão são considerados inadequados, pois dificilmente resultam em eclosões perfeitas. Ovos de tamanho reduzido, por sua vez, frequentemente carecem de gema ou óvulo. Alterações na estrutura da casca, bem como sua má qualidade, podem ser indicativas de distúrbios de saúde nas aves reprodutoras ou de deficiências nutricionais, especialmente de cálcio, conforme evidenciado nos estudos de Kok (2011).

2.2. INCUBAÇÃO DOS OVOS

De acordo com North (1990), a incubação é uma etapa essencial em que o embrião se desenvolve até o nascimento do pintinho. Esse processo requer condições controladas de calor e umidade, podendo ocorrer de forma natural, quando a galinha realiza a incubação, ou artificialmente, por meio de chocadeiras com fontes térmicas, como lâmpadas ou resistências elétricas. O tempo necessário para a incubação, bem como os níveis apropriados de temperatura e umidade, variam conforme a espécie da ave. No caso das galinhas, os ovos normalmente demoram cerca de 21 dias para concluir o processo de incubação sob condições apropriadas.

A temperatura é o fator mais determinante, sendo, do ponto de vista do embrião, provavelmente o único de importância crítica, pois influencia diretamente o ritmo do metabolismo embrionário e, por consequência, o estágio de seu desenvolvimento. Mudanças na temperatura podem causar falhas no desenvolvimento embrionário, levando à queda na taxa metabólica ou gerando dificuldades operacionais no incubatório, conforme observado por Calil (2007).

Segundo Meyerhoff (1992 *apud* Calil, 2007), durante a incubação podem ocorrer perdas embrionárias nas fases iniciais, entre o 0º e o 4º dia do processo. De acordo com Labet (1989 *apud* Almeida, 2008), temperaturas abaixo do ideal retardam o nascimento, provocando fechamento inadequado do umbigo e resultando em pintinhos com baixa taxa de eclosão. Por outro lado, temperaturas elevadas aceleram a eclosão, provocando o surgimento de pintinhos comprometidos, com desidratação ou problemas no fechamento do umbigo, além de elevarem os casos de pintinhos mortos nas bandejas e a mortalidade entre o 18º e o 21º dia do ciclo de incubação.

2.2.1. Temperatura

De acordo com Kok (2011), uma incubadora deve fornecer condições térmicas comparáveis com as fornecidas por uma galinha choca que mantém os ovos quentes através do seu calor corporal. Não se deve incubar ovos durante as estações do ano em que a temperatura ambiente durante o dia ultrapassa os 40°C. Nessas condições, a incubação torna-se inviável, uma vez que o calor extremo compromete o desenvolvimento embrionário e pode levar à destruição dos embriões.

A temperatura experimentada pelo embrião dentro de uma incubadora depende, principalmente, de três fatores, descritos por French (1997): a temperatura do ar no interior da incubadora, a transferência de calor entre o embrião e o ambiente da incubadora e a produção de calor metabólico pelo próprio embrião.

Durante a incubação (especialmente na primeira semana), a temperatura é de extrema importância. A temperatura ideal nas duas primeiras semanas é de 38°C, admitindo-se uma variação máxima de meio grau, tanto para mais quanto para menos. Variações superiores a 1°C afetam negativamente a taxa de sucesso na incubação

dos ovos. Um aumento excessivo da temperatura pode ter consequências desastrosas: caso ultrapasse 40,5°C, o efeito sobre os embriões será fatal. Por outro lado, uma redução da temperatura provoca o atraso da incubação, mas tende a causar danos menos severos do que o superaquecimento (Kok, 2011).

2.2.2. Umidade

De acordo com Kok (2011), ao longo da incubação, ocorre a evaporação da umidade presente nos ovos, sendo que a taxa com que isso acontece está associada à quantidade de umidade presente no interior da incubadora. Para assegurar bons índices, recomenda-se que, ao final do 18º dia do processo, os ovos tenham perdido entre 11% e 13% do seu peso inicial. Para tanto, é essencial manter a umidade interna da incubadora entre 50% e 70% até o estágio em que os embriões iniciam a quebra da casca.

Segundo Decuyper (1992), a umidade relativa é um fator que pode apresentar variações maiores do que a temperatura sem comprometer drasticamente a eclosão, desde que se mantenha dentro de uma faixa considerada adequada, por volta de 50% a 65%, a fim de favorecer melhores índices. Durante a fase de desenvolvimento, o embrião consome oxigênio e elimina dióxido de carbono, tornando-se sensível à qualidade do ar ao seu redor.

Estudos anteriores, realizados por Lundy (1969), apontam que a faixa ideal de umidade no interior da incubadora varia entre 40% e 70%. Outros estudiosos, como Robertson (1961) e Bruzual (2000), relatam que o melhor desempenho de eclosão é alcançado quando a umidade relativa é mantida entre 50% e 55% nos primeiros 18 dias do processo. Já nos três últimos dias, esse valor deve ser elevado para cerca de 70%. Umidade excessiva pode gerar pintainhos mais frágeis, enquanto níveis muito baixos causam filhotes grudados à casca.

2.2.3. Viragem dos Ovos

A fim de manter os embriões centralizados durante o seu desenvolvimento e evitar que fiquem aderidos às cascas, é necessário realizar a rotação dos ovos três vezes ao dia ao longo dos primeiros 18 dias. Esse giro frequente dos ovos assegura que o embrião permaneça no centro durante seu crescimento. É preferível realizar essa rotação em intervalos regulares ao longo do dia do que concentrar todas em menos momentos. Se os ovos deixarem de ser movimentados, a incubação poderá apresentar falhas (Kok, 2011).

Segundo Deeming (1989 *apud* Decuypere, 1992), a falta da rotação adequada pode comprometer a circulação do líquido do alantoide e do âmnio, além de influenciar na distribuição do albúmen, o que resulta em aderência do embrião e da gema à membrana interna da casca. Essas adesões aumentam a ocorrência de posicionamento incorreto do embrião.

De acordo com Kok (2011), após o 18º dia de incubação, a movimentação dos ovos deve ser suspensa. A partir de três a quatro dias antes da eclosão, os ovos devem permanecer estáticos, pois os pintinhos precisam se posicionar para iniciar a quebra da casca, e isso é mais eficiente quando não há movimentação. Nessa etapa, o embrião já está bem desenvolvido e utilizou quase toda a gema, reduzindo assim a possibilidade de ser esmagado entre a gema e a casca.

2.2.4. Ventilação

Conforme Kok (2011), os pintinhos em desenvolvimento no interior dos ovos necessitam absorver oxigênio e libertar dióxido de carbono. À medida que os embriões se desenvolvem, é fundamental garantir um fornecimento crescente de ar fresco. Portanto, é importante que haja um arejamento adequado, particularmente tendo em conta que se produziram, possivelmente, outros gases venenosos se houver ovos podres presentes na incubadora.

Ainda segundo o autor, para se obter uma ventilação adequada deve-se equipar a incubadora com orifícios de arejamento, tanto abaixo como acima do nível

dos ovos. Quanto maior for a quantidade de ovos presentes na incubadora e maior a idade dos embriões, maior é a quantidade de oxigénio requerida. Por conseguinte, deve-se aumentar, gradualmente, a intensidade do arejamento no decorrer do período de incubação.

Adicionalmente, Tona *et al.* (2022) destacam que pesquisas recentes evidenciam a importância da ventilação controlada não apenas para assegurar a troca gasosa (fornecendo oxigênio em quantidades adequadas e eliminando o acúmulo de dióxido de carbono), mas também para manter a uniformidade térmica e a umidade no ambiente de incubação, fatores que impactam diretamente a viabilidade embrionária e a uniformidade do lote.

2.3. MANUSEIO NA HORA DA INCUBAÇÃO

Para Kok (2011), a incubadora deve ser posicionada em um ambiente fresco, sombreado e tranquilo, sem trepidações causadas por veículos ou máquinas pesadas que passam nas proximidades, portanto, não deve ser colocada dentro do galinheiro. O local deve ser adequadamente ventilado, evitando correntes de ar. Antes de usar a incubadora com ovos, é recomendável operá-la vazia por pelo menos uma semana. Como mostra a Tabela 1, existem quatro fatores essenciais para a incubação de ovos: temperatura, umidade, ventilação e viragem dos ovos. A temperatura é o fator mais crítico, mas a umidade também é crucial e deve ser cuidadosamente controlada para evitar problemas durante a incubação. É importante notar que os ovos não devem ser virados após o dia 18, pois os pintainhos começam a perfurar as cascas nessa fase. Além disso, a incubadora não deve ser aberta desnecessariamente para manter uma umidade relativa ideal.

Tabela 1 – Manuseio na Incubação

Dias de incubação	Temperatura	Umidade relativa	Viragens/dia (mínimo)	Arejamento
0 – 18	37,8 – 38,5°C	50 – 60%	3	Aumento gradual
18 – 21	37,2 – 37,8°C	50 – 60% até 1/3 dos ovos terem cascas perfuradas; logo 60 – 70%	Não virar	Manter

Fonte: Adaptado de Kok (2011)

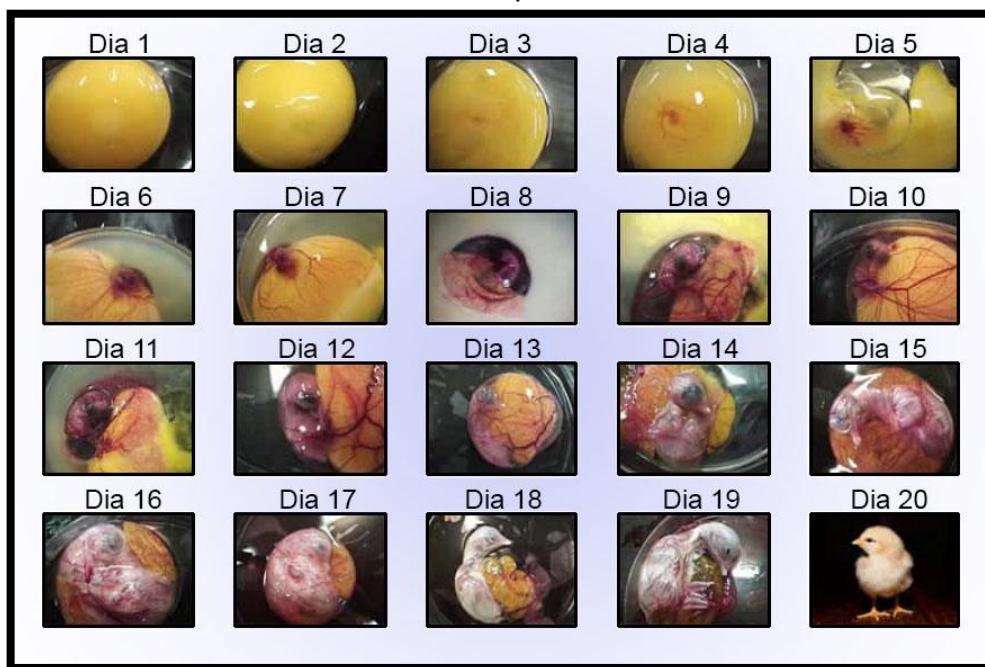
Durante os primeiros 14 dias, a ventilação deve ser controlada de forma a garantir uma troca gasosa eficiente, sem comprometer a estabilidade térmica interna. Já na fase final, iniciada no 18º dia, interrompe-se completamente a viragem dos ovos e eleva-se gradualmente a umidade relativa para cerca de 65%, favorecendo a maceração da casca e a eclosão dos pintainhos (Deeming, 2002).

2.4. DESENVOLVIMENTO EMBRIONÁRIO

Segundo Kok (2011), quando os ovos fecundados são mantidos a temperaturas inferiores a 20°C, o desenvolvimento do embrião é interrompido temporariamente, retomando apenas após o início da incubação, seja por uma galinha choca ou por meio de equipamentos próprios.

Durante esse processo, o embrião começa a se desenvolver a partir do disco germinativo, localizado sobre a gema, formando inicialmente estruturas como o coração e os vasos sanguíneos. Por volta do sétimo ao nono dia de incubação, já é possível visualizar essas veias com a ajuda de uma lanterna. À medida que o desenvolvimento prossegue, o embrião utiliza principalmente a clara e parte da gema como fonte de nutrição até o momento da eclosão (Figura 2).

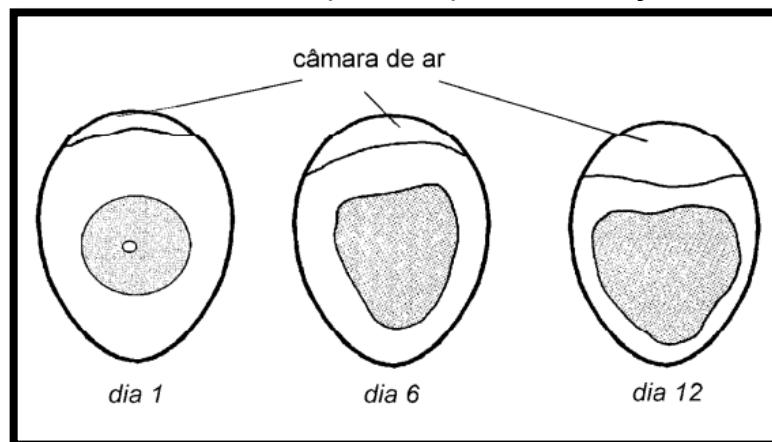
Figura 2- Desenvolvimento do embrião de pintainho



Fonte: Adaptado de Ferreira (s.d.)

Conforme aborda Kok (2011), nos últimos dias antes da eclosão, o pintainho usa seu bico para perfurar a membrana abaixo da câmara de ar, iniciando assim uma respiração normal através dos pulmões. Isso marca o início do processo de perfuração da casca e pode-se ouvir o pintainho piando dentro do ovo. Como pode-se visualizar na Figura 3, o nível adequado de umidade é crucial durante a incubação: se for muito baixo, os ovos secam e se for muito alto, a câmara de ar pode diminuir excessivamente, o que compromete a sobrevivência do pintainho.

Figura 3- Tamanho da câmara de ar pelo tempo de incubação



Fonte: Kok (2011)

De acordo com Tona *et al.* (2022), o controle preciso da temperatura, da umidade e da ventilação é fundamental para o desenvolvimento adequado das estruturas embrionárias, bem como para a sincronização da eclosão, assegurando o nascimento de pintinhos saudáveis e viáveis.

2.5. ECLOSÃO

Os pintinhos não eclodem todos ao mesmo tempo, podendo haver um intervalo de até 40 horas entre o primeiro e o último a nascer. Para não perturbar as condições ideais de incubação, é recomendável não abrir a incubadora antes que a maioria dos pintinhos tenha eclodido. Isso evita dificuldades para os pintinhos que ainda estão em processo de eclosão (Kok, 2011).

Ainda segundo o autor, os pintinhos recém-nascidos podem sobreviver por 1-2 dias sem alimentação, embora seja preferível começar a alimentá-los imediatamente após o nascimento. Assim que a maioria dos pintinhos apresentar penugem seca e fofa, é aconselhável removê-los imediatamente da incubadora. Não é recomendável esperar pela eclosão dos ovos restantes.

3. CONTROLADORES

O presente capítulo apresenta uma visão geral sobre a evolução e a aplicação dos sistemas de controle automático, com ênfase nos principais tipos de controladores utilizados na indústria e em projetos de automação: *On/Off*, Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativo (PD) e Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Inicialmente, foi realizada uma breve contextualização histórica dos controladores, seguida pela descrição de suas características e, logo após, foram apresentadas algumas técnicas de sintonia utilizadas em seu funcionamento.

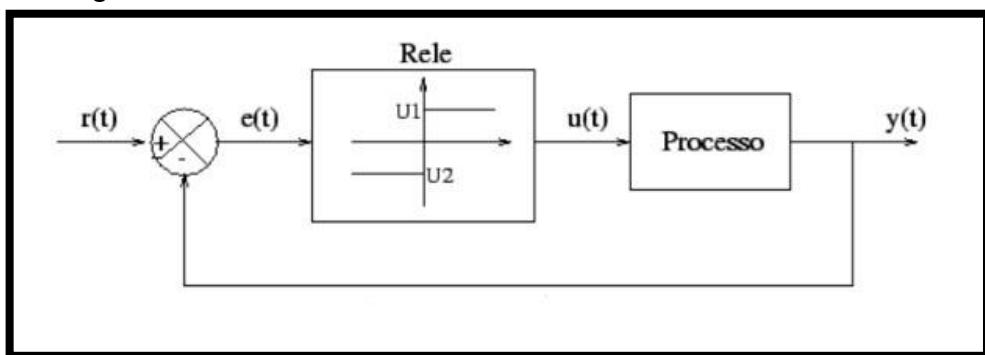
3.1. CONTROLE ON/OFF

De acordo com *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (2020), o controle *On/Off* baseia-se na leitura de sensores que monitoram uma variável de processo, como a temperatura, e decidem se uma ação corretiva deve ser tomada. O funcionamento é bastante intuitivo: se o valor medido estiver fora da faixa desejada, o sistema realiza uma ação de correção, caso contrário, mantém-se inativo.

O autor descreve ainda o funcionamento do controle *On/Off* utilizando como exemplo o funcionamento de um forno automático. Nesse caso, o usuário define uma temperatura desejada e, a partir disso, o forno começa a aquecer. Quando a temperatura estabelecida é atingida, o sistema precisa tomar uma nova decisão, pois se continuar ligado, a temperatura continuará subindo. Neste ponto, o controle *On/Off* entra em ação: o sensor faz uma leitura periódica da temperatura e, com base nessa leitura, determina se o forno deve continuar aquecendo ou ser desligado. Esse processo ocorre repetidamente em intervalos de tempo definidos, garantindo que a temperatura permaneça próxima ao valor de referência.

Nesse tipo de controle, o atuador geralmente é modelado por um relé, como ilustra a Figura 4, representando a natureza binária da ação (ligada ou desligada), (Silva, 2000).

Figura 4- Diagrama de Blocos Controle On/Off



Fonte: Silva (2000)

Segundo Silva (2000), como podem-se visualizar na Equação 1, o sinal de controle $u(t)$ assume apenas dois valores distintos, dependendo do sinal do erro, ou seja, se a variável medida está acima ou abaixo do ponto de referência. A operação pode ser realizada com um simples relé físico, dada a simplicidade do sistema.

$$u(t) = \begin{cases} U_1 & \text{se } e(t) > 0 \\ U_2 & \text{se } e(t) < 0 \end{cases} \quad (\text{Equação 1})$$

Embora simples, a ação de ligar e desligar é bastante eficaz em aplicações onde não há exigência de alto desempenho dinâmico nem precisão elevada. Por isso, o controle *On/Off* é amplamente utilizado em sistemas como termostatos de refrigeradores e sistemas de controle de nível de água com boias (Silva, 2000).

Historicamente, o controle *On/Off* tem sido amplamente empregado em sistemas de controle de ambiente, especialmente em equipamentos como ar-condicionado portáteis, de parede ou tipo split, todos equipados com termostatos. Nesses casos, o controlador *On/Off* atua dentro de limites pré-determinados, como os valores “Máx” e “Min”. Fora desses limites, não há atuação. Embora esse tipo de sistema utilize *feedback* (realimentação), assim como controladores proporcionais, a principal característica dos sistemas *On/Off* é que a variável controlada oscila entre os pontos de ligar e desligar, e não há capacidade de eliminar desvios (*offset*) no valor de referência (Ashcroft Willy Brasil, 2025).

3.2. SURGIMENTO E EVOLUÇÃO DO CONTROLE PID

Em 1911, Elmer A. Sperry construiu o primeiro controlador completo de navio para a Marinha dos EUA, projetando seu sistema com o propósito de imitar o comportamento de um timoneiro (West Controls Solutions, s.d.). Anos depois, em 1922, Nicolas Minorsky formulou matematicamente essas observações: ele analisou o trabalho de um bom timoneiro e mostrou que a ação de controle ideal seria composta de três termos (proporcional, integral e derivativo do erro), para manter a estabilidade direcional do navio (Bennett, 1994).

Em 1942, Ziegler e Nichols (1942) publicaram seu clássico trabalho “*Optimum Settings for Automatic Controllers*”, propondo um método de sintonia empírica para ajustar parâmetros PID a partir da resposta do processo. Eles mostraram como determinar os ajustes ótimos do controlador com base em testes em malha aberta e fechada. No pós-guerra, instrumentistas introduziram amplamente controladores de dois e três termos analógicos em processos industriais, consolidados como padrão de controle (Bennett, 1994).

Durante as décadas de 1950 e 1960, a chegada dos computadores analógicos e, em seguida, digitais impulsionou significativamente o uso do controle PID. Esses avanços tecnológicos viabilizaram a adoção de controladores PID em sistemas de maior complexidade e favoreceram a automação em larga escala de processos industriais (Astrom; Hagglund, 1995).

Sensores digitais de alta precisão, controladores lógicos programáveis (CLPs) e sistemas de controle distribuído (SCADA/DCS) passaram a integrar o PID como função nativa, com interfaces gráficas e recursos de sintonia automática embutidos (Astrom; Hagglund, 1995). Técnicas de auto sintonia baseadas em *relay* e outros algoritmos avançados permitem ajustes em tempo real e manutenção de desempenho ótimo (Emerson, 2013).

Segundo Roth (2023), nos anos mais recentes, os controladores PID têm se beneficiado dos avanços na instrumentação, graças à evolução de sensores, atuadores e ao processamento de sinais. A incorporação desses controladores em ambientes de controle digital distribuído (CDD) e em CLPs elevou o PID ao status de solução indispensável em diversas aplicações industriais modernas.

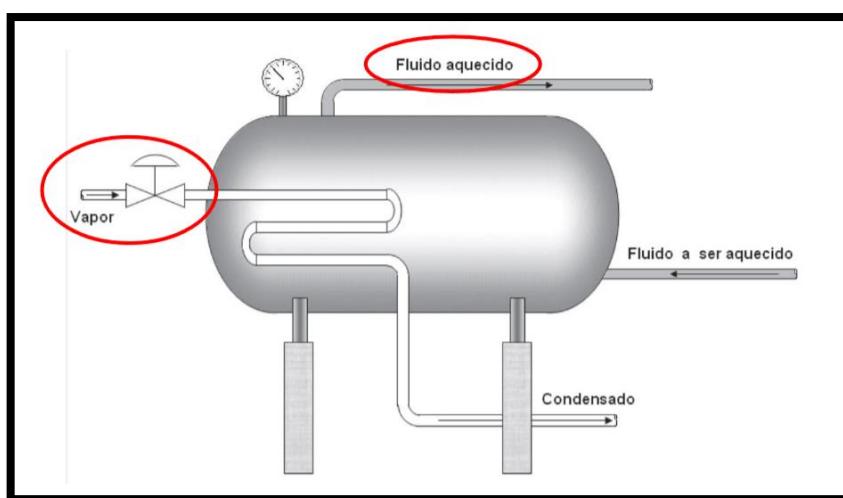
3.3. MALHAS DE CONTROLE

Um sistema de controle é formado por diversos dispositivos e aparelhos utilizados para manter estável uma determinada grandeza do processo (saída). Dependendo da forma de controle adotada, esse sistema pode ser categorizado como de malha aberta ou malha fechada (IFC, 2016).

3.3.1. Sistema de Malha Aberta

Segundo IFC (2016), um sistema com malha aberta é caracterizado pelo fato de que a grandeza monitorada (saída) não é utilizada para influenciar a grandeza de entrada. Nesse tipo de sistema, mesmo que seja possível acompanhar a variável do processo, ela não interfere no ajuste da entrada. Tomando como exemplo um trocador de calor, como mostrado na Figura 5, a temperatura do fluido ao sair do equipamento não afeta a temperatura do vapor que está sendo introduzido no sistema.

Figura 5- Trocador de Calor em malha aberta



Fonte: IFC (2016)

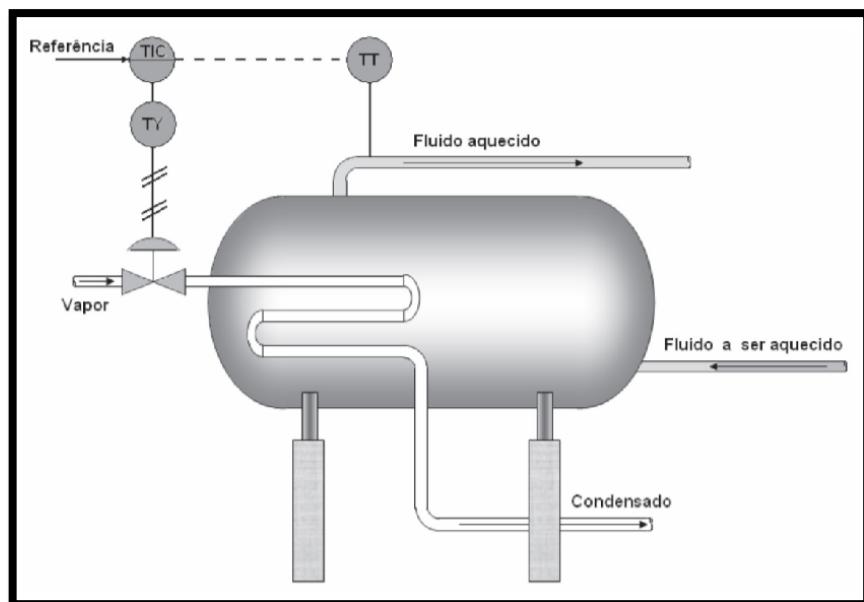
Este tipo de sistema apresenta sérias limitações diante de perturbações externas, pois a ausência de retorno impede que o processo seja detectado e ajustado

automaticamente. Sem *feedback*, não há mecanismo para equilibrar o sistema após variações externas, essa deficiência compromete tanto a estabilidade quanto o desempenho do processo, fazendo com que sistemas sem realimentação sejam inadequados para ambientes sujeitos a imprevistos (Cardoso, 2020).

3.3.2. Sistemas de Malha Fechada

Em um sistema com malha de controle fechada, a grandeza de saída do processo é regulada por ajustes na variável de entrada, também chamada de variável de atuação. Essa correção pode ser feita manualmente por um profissional ou de forma automatizada, utilizando dispositivos de controle (IFC, 2016). Segundo o autor, o valor da variável de processo (PV) é monitorado continuamente, comparado ao valor de referência (SP) e, quando necessário, ajustado por meio da variável de atuação (MV). A Figura 6 apresenta um trocador de calor, no qual a medição da variável de processo é realizada por meio de um sensor de temperatura (TT).

Figura 6- Trocador de calor em malha fechada

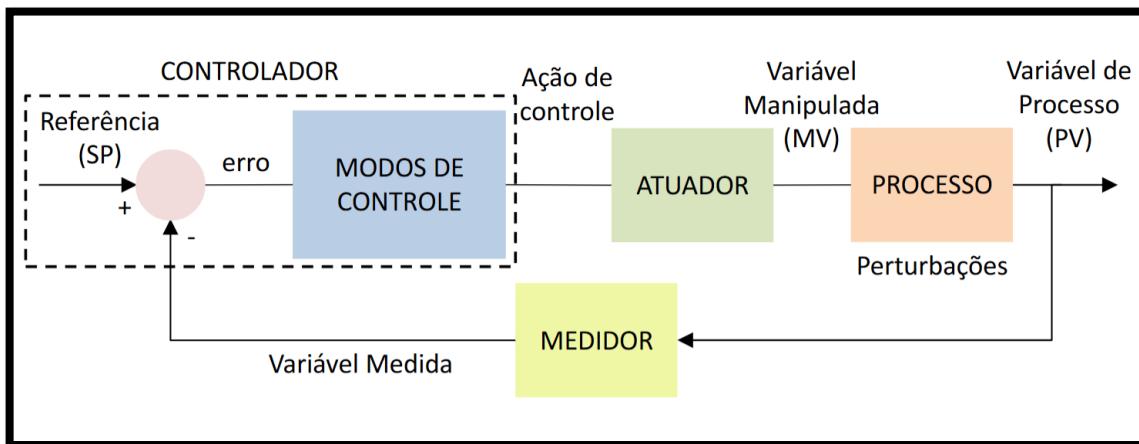


Fonte: IFC (2016)

O controlador (TIC) compara continuamente o valor medido com o ponto de ajuste para calcular o erro ($\text{erro} = \text{SP} - \text{PV}$). Em seguida, com base nesse erro, o TIC

envia o sinal de correção à válvula de controle, que ajusta o fluxo do processo. Podemos ver na Figura 7, a representação em diagrama de blocos dessa malha de controle fechada (IFC, 2016).

Figura 7- Diagrama de blocos do trocador de calor em malha fechada



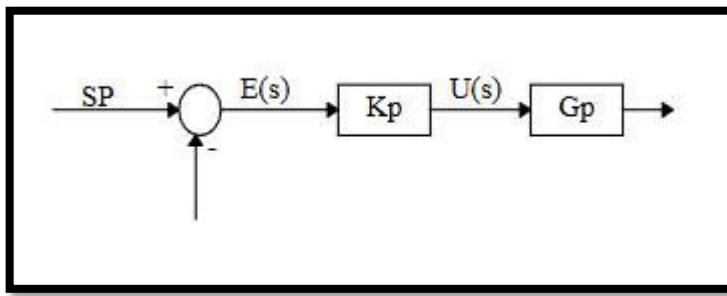
Fonte: IFC (2016)

O controle em malha fechada desempenha um papel crucial na automação de processos ao permitir a correção contínua de desvios entre a saída real e o valor de referência, reduzindo significativamente o erro estacionário e aumentando a robustez do sistema frente a perturbações externas (Franklin *et al.*, 2019). Além disso, a realimentação inteligente possibilita a substituição de operadores humanos em tarefas repetitivas e de alto risco, garantindo maior segurança e consistência na operação (Ogata, 2010).

3.4. CONTROLE PROPORCIONAL

A ação proporcional atua calculando um erro padrão, representado por U , a partir da multiplicação de uma constante pelo valor do sinal de erro. Isso implica que essa ação ajusta a saída do controlador de forma proporcional à magnitude do erro (Instituto Metrópole Digital, s.d.). Conforme explicado por Lourenço (1997), nesse tipo de controlador, a saída está diretamente relacionada ao sinal de erro $e(t)$, conforme representado no diagrama de blocos da Figura 8 e descrito na Equação 2.

Figura 8- Diagrama de Blocos Controle Proporcional



Fonte: Lourenço (1997)

$$u(t) = K_p e(t) \xrightarrow{L} U(s) = K_p E(s) \quad (\text{Equação 2})$$

Conforme Lourenço (1997), o termo K_p refere-se ao ganho proporcional. Esse tipo de controlador atua como um amplificador cujo ganho pode ser ajustado. Uma característica fundamental dessa ação de controle é que, sempre que há uma variação na carga, permanece um erro residual constante. Esse erro em regime permanente (que depende tanto do valor de K_p quanto da carga aplicada), pode ser reduzido ao se aumentar o ganho proporcional.

Entretanto segundo o autor, esse ajuste tende a prolongar o tempo necessário para o sistema se estabilizar e, em casos extremos, pode até causar instabilidade. Assim, o autor conclui que controladores proporcionais devem ser empregados apenas quando for possível adotar um K_p suficientemente alto para manter o erro estacionário dentro de limites aceitáveis ou quando as mudanças de carga forem pouco frequentes.

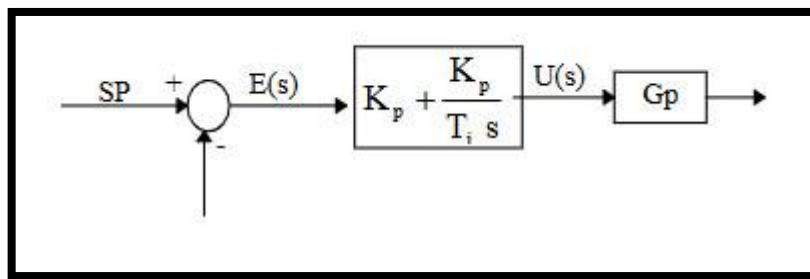
3.5. CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL

Segundo Åström e Hägglund (1995), a ação integral de controle soma o erro ao longo do tempo e gera um termo de controle proporcional à integral desse erro. Ao ajustar esse erro acumulado, o componente integral assegura que o processo alcance o valor de referência (*setpoint*). Contudo, a ação integral não é eficaz por si só: ela deve estar associada à ação proporcional, formando um controlador PI. Isoladamente, a integral apenas corrige o erro estacionário residual deixado pelo controle

proporcional, possibilitando que, com o tempo, o resultado desejado seja finalmente atingido.

Quando a saída do controlador deixa de depender apenas do erro instantâneo e passa a incluir também a integral desse erro ao longo do tempo, configura-se um controlador proporcional-integral. Nesse esquema, o componente proporcional reage imediatamente às variações, enquanto o termo integral acumula o desvio remanescente e promove sua correção gradual, garantindo a convergência do sistema ao ponto de ajuste desejado (Lourenço, 1997). O autor ilustra essas ideias nas Figuras 9 e 10:

Figura 9- Diagrama de Blocos Controle Proporcional Integral

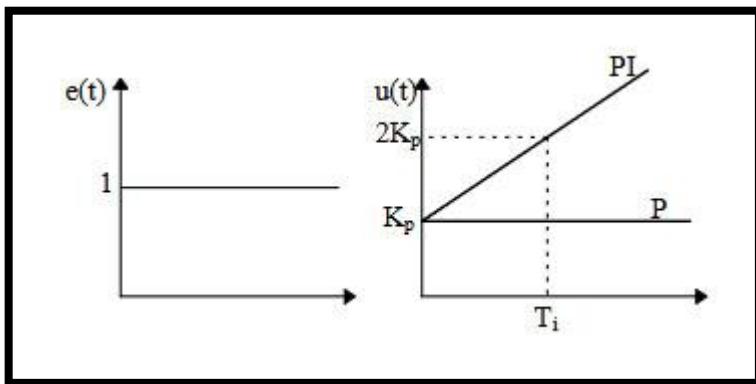


Fonte: Lourenço (1997)

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau) \xrightarrow{L} U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_is}\right) E(s) \quad (\text{Equação 3})$$

O tempo integral, denominado TI, representa o intervalo necessário para que a contribuição da ação integral iguale a da ação proporcional. Esse parâmetro é normalmente expresso em unidades de tempo, como segundos ou minutos. O valor de TI influencia diretamente a rapidez com que o termo integral corrige o erro acumulado. Quanto menor for TI, mais acelerada será essa correção, afetando a dinâmica do controlador (Lourenço, 1997).

Figura 10- Controle Proporcional comparado ao Controle Proporcional Integral



Fonte: Lourenço (1997)

De acordo com Lourenço (1997), a inserção da componente integral, ao acrescentar um polo na origem da função de transferência do controlador, assegura a eliminação do erro estacionário de posição em qualquer processo. Porém, ao mesmo tempo, prolonga o tempo de estabelecimento e deteriora a estabilidade relativa, efeitos geralmente indesejáveis. Em virtude disso, quando o termo integral é combinado com o proporcional, é necessário reduzir o ganho proporcional para manter o controle equilibrado.

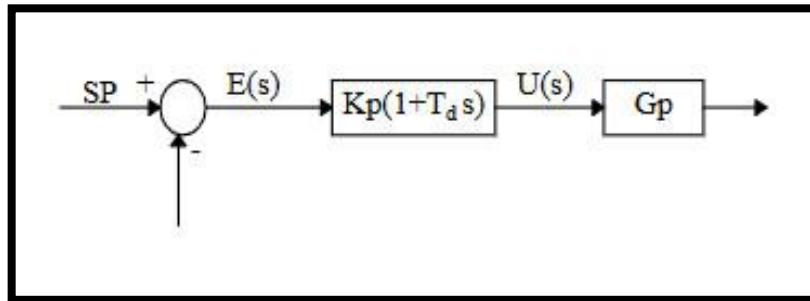
Ainda de acordo com o autor, o controlador PI torna-se a escolha adequada em aplicações sujeitas a variações frequentes de carga, especialmente quando um P puro não consegue reduzir o erro estacionário a níveis aceitáveis. Contudo, para evitar oscilações indesejadas provocadas pela ação integral, essas variações de carga devem ocorrer a um ritmo relativamente lento.

3.6. CONTROLE PROPORCIONAL DERIVATIVO

Conforme Bojorge (2017), a ação derivativa tem por objetivo conferir maior estabilidade ao sistema de controle, atuando de forma preventiva ao gerar um sinal proporcional à taxa de variação do erro ao longo do tempo, permitindo antecipar tendências de desvio e atenuar oscilações na resposta. Ainda segundo o autor, devido à sua elevada sensibilidade, o termo derivativo não é eficaz isoladamente e deve ser combinado à ação proporcional (resultando em um controlador PD) ou à ação proporcional-integral (formando o controlador PID) para alcançar desempenho

adequado. Lourenço (1997) ressalva que o sinal de controle ($u(t)$) é proporcional ao erro e à sua taxa de variação, como ilustrado nas Figuras 11 e 12:

Figura 11- Diagrama de Blocos Controle Proporcional Derivativo

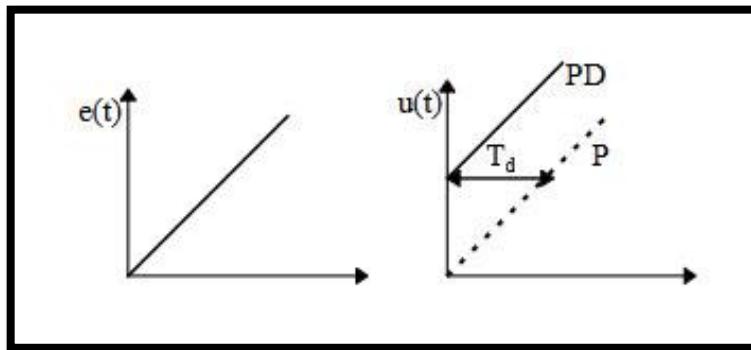


Fonte: Lourenço (1997)

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \xrightarrow{L} U(s) = K_p(1 + T_d s) \quad (\text{Equação 4})$$

O tempo derivativo TD corresponde ao intervalo de antecipação da ação derivativa em relação à ação proporcional, sendo medido em segundos ou minutos (Lourenço, 1997).

Figura 12- Comparação da resposta dos controladores P e PD



Fonte: Lourenço (1997)

O fato de o sinal de controle derivativo ser proporcional à taxa de variação do erro impede seu uso isolado, já que ele atua apenas em regimes transitórios. Quando combinado com a ação proporcional, o modo derivativo produz um controlador de elevada sensibilidade, pois antecipa correções ao reagir à velocidade de mudança do erro. Embora não influencie diretamente o erro estacionário, ele agrupa amortecimento ao sistema (melhorando a estabilidade), e permite a adoção de ganhos proporcionais mais elevados, o que, por sua vez, reduz o desvio em regime

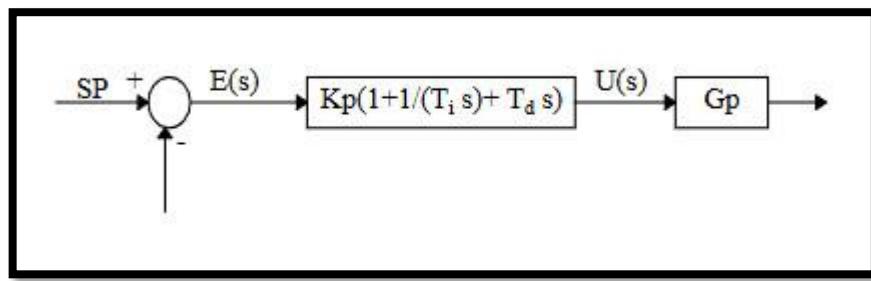
permanente. Como ponto negativo, a ação derivativa tende a amplificar ruídos de alta frequência (Lourenço, 1997).

3.7. CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

A integração dos três termos em um controlador PID permite gerar uma ação de controle harmoniosa, capaz de se ajustar com precisão às características dinâmicas do processo. O componente proporcional atua de forma imediata sobre o erro instantâneo, embora deixe um desvio em regime permanente, o termo integral por sua vez, corrige progressivamente esses erros acumulados, eliminando-os ao longo do tempo. E a ação derivativa monitora a evolução do sinal de erro para antecipar variações futuras, promovendo o equilíbrio global do sistema (Astrom; Hagglund, 1995).

De acordo com Lourenço (1997), afirma-se que o controle PID resulta num compromisso entre as vantagens e desvantagens de um PI e as vantagens de um PD. A saída do controlador é observada na Figura 13 e na Equação 5.

Figura 13- Diagrama de Blocos Controle PID



Fonte: Lourenço (1997)

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \xrightarrow{L} U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \quad (\text{Equação 5})$$

Nesse controlador, o termo integral atua eliminando o erro em regime permanente gerado por variações significativas de carga, enquanto o componente

derivativo, graças ao seu efeito de amortecimento, possibilita elevar o ganho e atenua a propensão a oscilações, resultando em uma resposta mais rápida em comparação aos controladores P e PI (Lourenço, 1997).

Ainda de acordo com o autor, o emprego do controle derivativo traz como principal resultado um aprimoramento da estabilidade do sistema, diminuindo a sobre-elevação e aprimorando a resposta transitória. Os impactos na resposta do sistema fechado ao adicionar os modos proporcional, integral e derivativo estão apresentados no Quadro 2.

Resposta CF	Tempo de Subida	Sobre elevação	Tempo de Estabelecimento	Erro Estacionário
Proporcional	Diminuição	Aumento	Sem Alteração	Diminuição
Integral	Diminuição	Aumento	Aumento	Elimina
Derivativo	Sem Alteração	Diminuição	Diminuição	Sem alteração

Quadro 2- Efeitos dos Modos P, I e D na Resposta em Malha Fechada

Fonte: Adaptado de Lourenço (1997)

Observe que essas correlações não são precisas, pois ao modificarmos um dos parâmetros do controlador, podemos estar modificando o impacto das outras ações. Portanto, a tabela deve ser apenas utilizada como referência ao definir os parâmetros do controlador (Lourenço, 1997).

3.7.1. Critérios para escolha do Controlador

A escolha do controlador mais adequado para uma dada aplicação não possui uma regra universal, em princípio, deve-se optar pelo modelo mais simples que atenda aos requisitos de resposta desejada, embora essa determinação só se torne viável em cenários de aplicação direta ou quando há dados de sistemas semelhantes que sirvam de referência (Lourenço, 1997).

Além disso, a escolha entre os controladores P, PI, PD ou PID pode ser guiada pelas características do processo: para sistemas que requerem eliminação do erro estacionário, o termo integral é essencial, enquanto para aqueles que precisam de redução da sobre-elevação ou aceleração do assentamento, o termo derivativo é benéfico. Assim, a seleção do controlador deve considerar tanto as condições de

operação quanto as metas de desempenho específicas do sistema em questão (Åström e Murray, 2008). De forma geral, adiciona-se o modo proporcional para ajustar o tempo de subida, o derivativo para controlar a sobre-elevação e o integral exclusivamente para corrigir o erro estacionário (Lourenço, 1997).

3.8. SINTONIA DE CONTROLADORES PID

A maior dificuldade na aplicação de controladores PID reside na sintonia adequada de seus três parâmetros, essencial para promover eficiência, estabilidade e desempenho satisfatório da malha de controle (Åström; Hägglund, 1995). Historicamente, Ziegler e Nichols (1942) propuseram o método de malha fechada baseado em oscilações sustentadas, no qual o ganho proporcional é ajustado até o surgimento de oscilações contínuas, a partir das quais se derivam tabelas de ajustes para P, I e D (Ziegler; Nichols, 1942).

Na prática, muitos engenheiros ainda recorrem ao ajuste manual por tentativa e erro, um procedimento que demanda tempo e experiência do operador (Silva, 2005). A construção de modelos matemáticos precisos do processo controlado tem sido apontada como estratégia indispensável para a redução do tempo de sintonia e para a garantia de resultados consistentes em campo (Garcia, 2017).

3.8.1. Sintonia pelo método de Tentativa e Erro

De acordo com Roth (2023), o método de tentativa e erro consiste em ajustar os parâmetros do PID e observar continuamente o comportamento do processo até atingir o desempenho desejado, como pode-se visualizar no Quadro 3.

Etapas	Execução
1- Inicialização:	Comece com valores iniciais para Kp, Ki e Kd.
2- Ajuste e Avaliação:	Ajuste um dos parâmetros e observe o desempenho do sistema de controle (Resposta em degrau, tempo de assentamento e <i>overshoot</i>)
3- Iteração:	Se o desempenho não for satisfatório, ajuste o parâmetro novamente e avalie o sistema.
4- Repetição:	Continue ajustando e avaliando até que o desempenho do sistema atinja os requisitos do projeto.

Quadro 3- Fluxo de Ajuste do controlador por tentativa e erro

Fonte: Adaptado de Roth (2023)

Esse procedimento exige tanto a compreensão de como cada parâmetro influencia a resposta do controle quanto a experiência prática em diferentes tipos de processo (Roth, 2023). De acordo com o Instituto Metrópole Digital (s.d.), o ganho proporcional (K_p) determina a velocidade de reação do sistema, podendo torná-lo instável se definido em valor excessivo, o ganho integral (K_i) corrige o erro em regime permanente, mas valores elevados podem gerar oscilações; e o ganho derivativo (K_d) aprimora a estabilidade e o desempenho geral, embora em níveis altos possa amplificar ruídos.

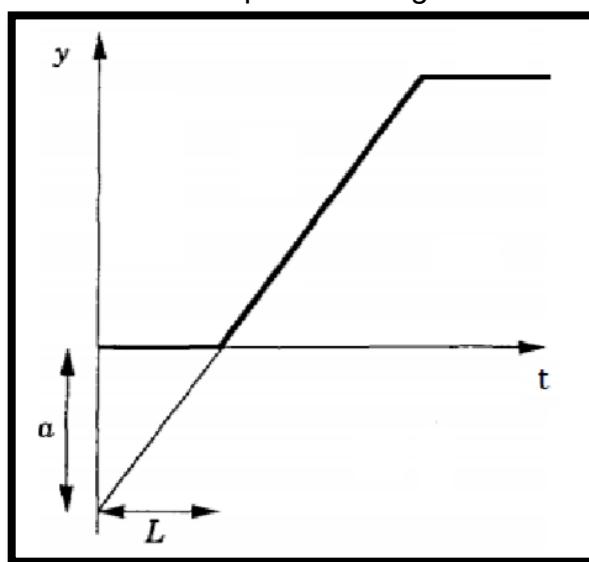
3.8.2. Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols

Em 1942, o engenheiro químico John G. Ziegler e o matemático Nathaniel B. Nichols propuseram dois procedimentos de ajuste de controladores PID, fundamentados na análise de certas características de processos em malha aberta (primeiro método) e em malha fechada (segundo método). A partir dessas propriedades, os autores derivaram fórmulas matemáticas simples para expressar os parâmetros do controlador (K_p , T_i e T_d). O objetivo de suas regras de sintonia era limitar o sobressinal a, no máximo, 25% (Fermino et al., 2014).

3.8.2.1. Primeiro Método de Ziegler-Nichols: Resposta ao degrau

O primeiro procedimento descrito por Ziegler e Nichols utiliza a resposta a um degrau de um sistema com comportamento estável e cuja saída da planta apresenta um formato em “S”, operando em malha aberta, sendo definido por dois indicadores obtidos conforme ilustrado na Figura 14 (Fermino *et al.*, 2014).

Figura 14- Parâmetros e curva de resposta ao degrau



Fonte: Åström e Hägglund (1995)

Conforme Fermino *et al.* (2014), o instante em que a curva apresenta sua maior inclinação é inicialmente identificado, e a partir dele é desenhada uma linha que toca a curva apenas nesse local. O cruzamento dessa linha com o eixo horizontal indica o valor do tempo de atraso L , enquanto os parâmetros propostos por Ziegler e Nichols são obtidos conforme apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Método da Resposta ao Degrau

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$	-	-
PI	$0,9/a$	$3L$	-
PID	$1,2/a$	$2L$	$L/2$

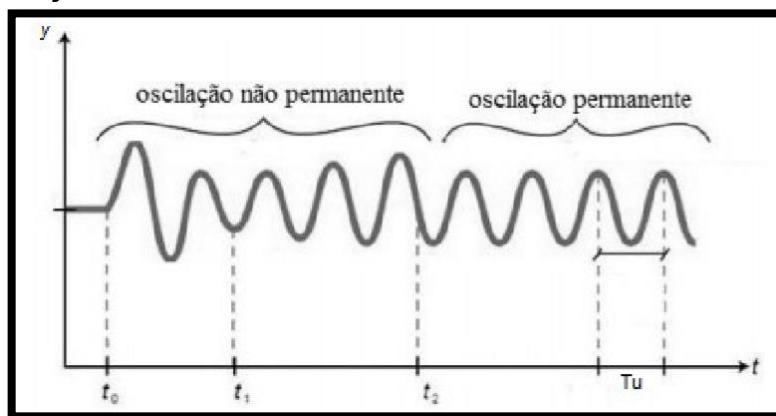
Fonte: Ziegler e Nichols (1942)

Apesar de apresentar ótimo desempenho na maioria dos controladores, esse modelo de sintonia nem sempre pode ser empregado devido à sua instabilidade (Campos; Teixeira, 2010).

3.8.2.2. Segundo Método de Ziegler-Nichols: Oscilação crítica

Esse método é indicado para sistemas que apresentam oscilações ou comportamento instável quando operam em circuito fechado. Ao associar um sistema em realimentação com um controlador proporcional conectado em série, é possível ajustar a intensidade do controlador até que o sistema apresente oscilações duradouras. Nessa condição, a intensidade do controlador proporcional, denominada ganho crítico, recebe o nome de K_u . O intervalo entre oscilações é denominado período crítico, identificado como T_u . A Figura 15 representa a situação em que o sistema se encontra marginalmente estável (Fermino et al., 2014).

Figura 15- Oscilação Crítica



Fonte: Fermino et al. (2014)

De acordo com Fermino et al. (2014), tal como no método anterior, a Tabela 3 apresenta os ajustes dos parâmetros sugeridos por Ziegler e Nichols para o controlador PID, em função dos valores de K_u e T_u :

Tabela 3- Método da oscilação crítica

Controlador	K _p	T _i	T _d
P	0,5K _u	-	-
PI	0,4K _u	0,8Tu	-
PID	0,6K _u	0,5Tu	0,125Tu

Fonte: Ziegler e Nichols (1942)

De modo geral, a sintonia obtida por meio desse método proporciona uma rejeição de perturbações satisfatória e uma resposta ao degrau superior àquela alcançada pelo método baseado exclusivamente na resposta ao degrau em malha fechada, já que apresenta sobressinal e tempo de acomodação reduzidos (Fermino et al., 2014).

Entretanto, esse procedimento também apresenta desvantagens: se ocorrer qualquer leitura durante o ensaio em malha aberta, não haverá correção automática, o que pode distorcer os resultados, e a resposta tende a ser oscilatória (projetada para um decaimento de $\frac{1}{4}$), sem que haja garantia de estabilidade e com outras limitações associadas (Garcia, 2017).

3.8.3. Sintonia com base no método de Cohen-Coon (CC)

O método proposto por Cohen e Coon (1953) destina-se à sintonia de plantas que apresentem tempos mortos relativamente longos. Para plantas cujo fator de incontrolabilidade excede 0,3, recomenda-se a aplicação dessa técnica. Assim como no método de Ziegler–Nichols, pressupõe-se que o processo possa ser representado por um modelo de primeira ordem, definido pelo ganho estático K, pela constante de tempo t e pelo tempo morto θ. Esses parâmetros são obtidos experimentalmente por meio da resposta a um degrau em malha aberta na entrada do sistema (Tabela 4).

Tabela 4- Método de Cohen-Coon

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\left(1,03 + 0,35 * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) * \frac{\tau}{K * \theta}$	-	-
PI	$\left(0,9 + 0,083 * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) * \frac{\tau}{K * \theta}$	$\frac{\left(0,9 + 0,083 * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}{\left(1,27 + 0,6 * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)} * \theta$	-
PID	$\left(1,35 + 0,25 * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) * \frac{\tau}{K * \theta}$	$\frac{\left(1,35 + 0,25 * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}{\left(0,54 + 0,33 * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)} * \theta$	$\frac{0,5 * \theta}{\left(1,35 + 0,25 * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}$

Fonte: Campos e Teixeira (2010)

O método de Cohen e Coon adota uma estratégia de sintonia mais agressiva em comparação ao método de Ziegler–Nichols. Na prática, isso se reflete em valores iniciais de ganho mais baixos, que podem ser ajustados para cima após a análise do desempenho do controlador (Campos; Teixeira, 2010).

4. COMPONENTES ELETRÔNICOS

De acordo com o Portal Distribuidora (2025), os componentes eletrônicos constituem a base de qualquer sistema embarcado ou circuito de controle, possibilitando desde a aquisição e o processamento de sinais até a atuação direta no ambiente físico. Prontamente foram exemplificadas as características e o funcionamento dos principais componentes eletrônicos presentes no projeto.

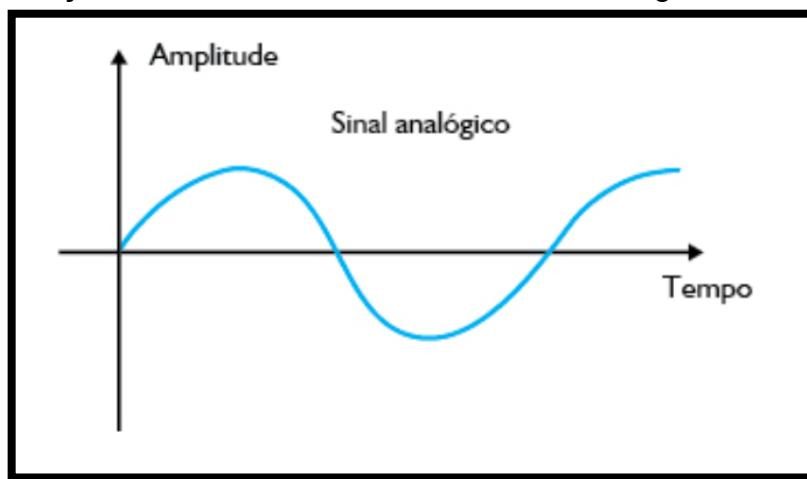
4.1. SENSORES

Os sensores são dispositivos projetados para converter grandezas físicas ou químicas em sinais elétricos proporcionais a essas variáveis. Sua escolha envolve critérios de faixa de medição, sensibilidade, linearidade e tempo de resposta, além de calibração cuidadosa para assegurar precisão na aquisição de dados (Mattede, s.d.).

4.1.1. Sensores Analógicos

Segundo a PST *Process Sensing Technologies* (2025), um sensor analógico é um dispositivo que detecta um fenômeno ou grandeza física e gera um sinal de saída cuja intensidade varia em proporção direta ao valor registrado. Em outras palavras, esses sensores produzem sinais contínuos que refletem com precisão a magnitude do parâmetro monitorado, sem recorrer a discretizações ou conversões para formato digital. Devido à sua natureza analógica, a saída desses sensores pode assumir infinitos valores ao longo do tempo, dentro de sua faixa de operação (Figura 16).

Figura 16- Ilustração do sinal de saída de um sensor analógico



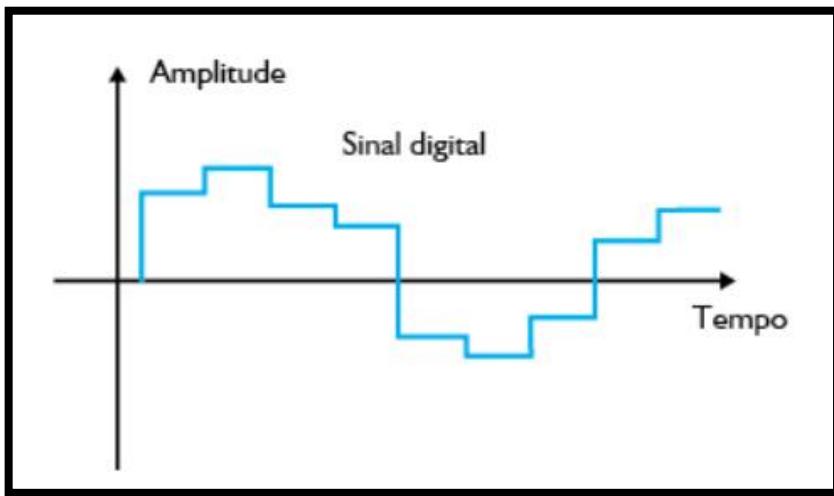
Fonte: Instituto Metrópole Digital (s.d.)

Levando em conta os valores mínimo e máximo de saída, sempre que o sensor perceber qualquer alteração, ele emitirá um sinal correspondente, de modo que sua resposta possa assumir infinitos níveis dentro dessa faixa de operação (Instituto Metrópole Digital, s.d.).

4.1.2. Sensores Digitais

Os valores binários representados pelos sinais digitais não são contínuos e só podem ser interpretados como zeros ou uns. Isso os torna mais simples de armazenar e manipular através de computadores quando comparamos com os sinais analógicos (Sensor CF, 2025). Na Figura 17, podem-se ter um melhor entendimento sobre o sinal digital.

Figura 17- Ilustração do sinal de saída de um conversor analógico digital



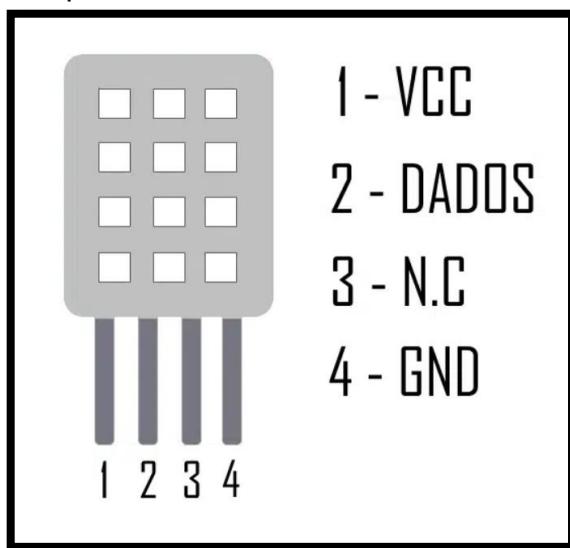
Fonte: Instituto Metrópole Digital (s.d.)

De acordo com Sensor CF (2025), os sinais digitais representam dados por meio de pulsos discretos, em contraste com os sinais analógicos, que utilizam formas de onda contínuas. Essa característica permite que os sinais digitais sejam transmitidos por longas distâncias sem perder suas informações e com menor suscetibilidade à interferência externa. Consequentemente, eles são predominantes em sistemas de comunicação contemporâneos.

4.1.3. Sensor DHT22

De acordo com Makerhero (2025), o sensor DHT22 é uma ferramenta versátil para medir temperatura e umidade, capaz de operar em uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa. Sua simplicidade de uso o torna uma escolha popular para projetos com microcontroladores, devido à sua interface, que fornece saída digital (Figura 18).

Figura 18- Descrição dos pinos do sensor DHT22



Fonte: Adaptado de Makerhero (2025)

Com uma interface simples de três pinos e baixo consumo de energia, o sensor é de fácil integração em projetos eletrônicos. Além disso, sua resposta rápida possibilita a atualização eficiente das informações ambientais (Makerhero, 2025). As especificações do sensor estão apresentadas no Quadro 4.

Especificações	Valores
Sensor	DHT22
Modelo	AM2302
Tensão de Operação	3-5 V
Faixa de Umidade	0 a 100%
Intervalo de Temperatura	-40° a +80°C
Corrente de Operação	2,5mA
Precisão de Umidade	± 2% UR
Precisão de Temperatura	± 0,5°C
Tempo de Resposta	2 Segundos
Dimensões (Sem terminais)	25mm x 15mm x 7mm

Quadro 4- Especificações do sensor

Fonte: Adaptado de Makerhero (2025)

Makerhero (2025) informa ainda que o sensor DHT22 é amplamente utilizado em aplicações que exigem monitoramento ambiental preciso. Ele opera por meio de um termistor para aferir a temperatura e de um elemento capacitivo de polímero com o propósito de medir a umidade relativa do ar. Ao ser energizado, o sensor aquece o termistor para detectar a temperatura do ambiente.

O elemento capacitivo interage com o vapor d'água do ar, absorvendo ou liberando moléculas de água, o que altera sua capacidade conforme a umidade presente. Essas variações são convertidas em sinais digitais, que são enviados ao microcontrolador pelo pino de dados. Em seguida, o microcontrolador interpreta esses sinais para calcular e apresentar as medições de temperatura e umidade (Makerhero, 2025).

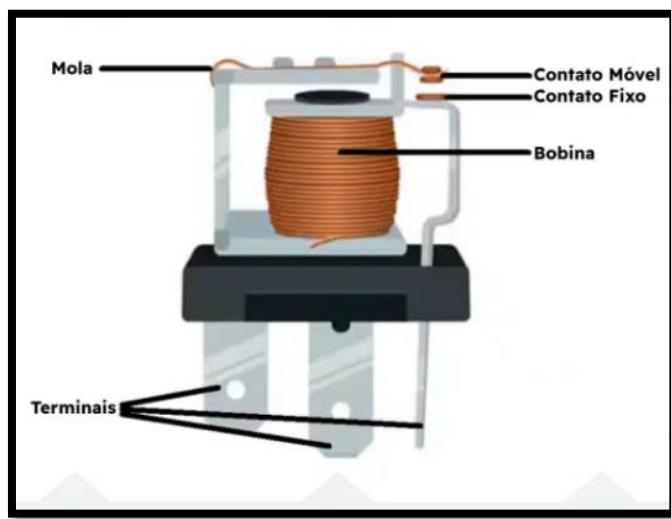
4.2. ATUADORES

Como ressalta Marques (2024), os atuadores são dispositivos responsáveis por converter diferentes formas de energia (hidráulica, pneumática ou elétrica), em movimento ou força mecânica controlada, sendo essenciais para a operação de válvulas e de quaisquer sistemas que exijam ações precisas, repetíveis e monitoradas. Conforme a fonte de energia empregada, terá aplicações em processos industriais variados, desde o controle de fluxo de fluidos até o acionamento de mecanismos automatizados.

4.2.1. Relés

Segundo Makerhero (s.d.), o relé é um componente eletromecânico que atua como um interruptor, sendo utilizado para acionar circuitos elétricos a partir de sinais de baixa intensidade. Sua principal função é amplificar o sinal elétrico, permitindo que um impulso de baixa potência controle o acionamento ou desligamento de circuitos de maior potência. Esse recurso é especialmente importante em sistemas que exigem a separação entre o circuito de comando e o circuito de potência. A Figura 19 ilustra a estrutura física de um relé.

Figura 19- Construção do relé



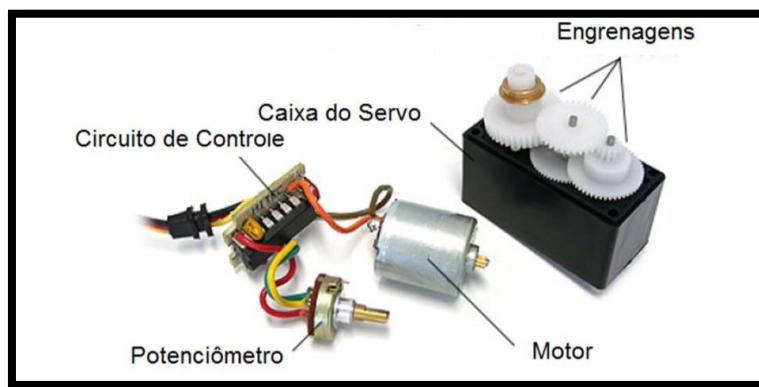
Fonte: Adaptado de Makerhero (s.d.)

O funcionamento de um relé é relativamente simples. Ele é formado por uma bobina e um conjunto de contatos responsáveis pela comutação do circuito. Quando uma corrente elétrica percorre a bobina, gera-se um campo magnético que aciona os contatos, permitindo a conexão ou o desligamento do circuito principal (Tron Controles Elétricos, 2024).

4.2.2. Servo Motor

De acordo com Universal Robots (2022), um servo motor é um dispositivo eletromecânico projetado para converter sinais de controle em movimento mecânico preciso, combinando um motor, um sistema de feedback e um controlador que interpreta sinais de controle por modulação ou por largura de pulso (Figura 20).

Figura 20- Componentes internos do Servo Motor



Fonte: Universidade Estadual Paulista (2013)

Segundo a Universidade Estadual Paulista (2013), o servo motor é movido por uma tensão de 5 V e recebe um sinal em formato PWM (*Pulse Width Modulation*). Esse sinal pode ser de 0 V ou 5 V. O sistema de controle do servo monitora o sinal dentro de um intervalo de 20 ms. Se neste intervalo de tempo o controle identifica uma mudança na largura do sinal, ele modifica a posição do eixo para que sua posição esteja em conformidade com o sinal recebido (Tabela 5).

Tabela 5- Tabela da posição do servo

Largura de Pulso (ms)	Posição do Servo (°)
1	0
1,5	90
2	180

Fonte: Adaptado de Universidade Estadual Paulista (2013)

O sistema de *feedback* informa continuamente a posição do eixo, permitindo que o controlador ajuste a operação do motor para alcançar e manter a posição ou velocidade desejada com alta precisão. Essa capacidade torna os servos motores ideais para aplicações que exigem controle rigoroso de movimento (Universal Robots, 2022).

4.3. FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Fontes de alimentação são equipamentos eletrônicos projetados para transformar uma forma de energia elétrica em outra, adequada ao funcionamento de circuitos ou dispositivos. Sua principal tarefa é entregar energia estável e regulada, assegurando o desempenho correto dos componentes, mesmo diante de variações na rede de entrada (como flutuações de tensão, alterações na frequência ou distorções na forma de onda fornecida pela concessionária). Esses dispositivos são indispensáveis em diversas áreas, desde aparelhos de uso diário, como smartphones e laptops, até sistemas industriais e equipamentos médicos (Makerhero, s.d.).

4.3.1. Fontes AC/DC

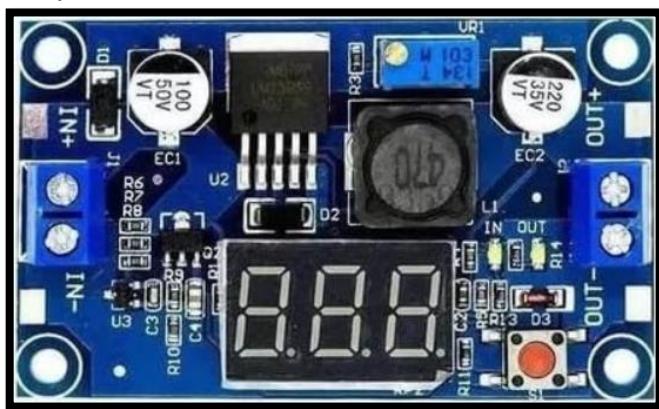
As fontes AC/DC convertem energia de corrente alternada em energia de corrente contínua. Esse processo começa com um transformador que reduz a tensão para um nível ligeiramente superior ao pico máximo desejado. Em seguida, a energia passa por um circuito retificador que transforma a corrente alternada em contínua, é filtrada para suavizar a onda e, por fim, é estabilizada por um regulador de tensão. Esse regulador mantém a tensão de saída constante, ajustando sua resistência interna para compensar variações na tensão de entrada ou na carga, assegurando que a saída permaneça dentro dos limites estabelecidos (Makerhero, s.d.).

Ainda de acordo com o autor, muitas fontes de alimentação contam com circuitos de proteção contra sobrecorrente, sobretensão e curto-circuito, garantindo a segurança tanto dos dispositivos conectados quanto do próprio sistema. Elas também podem incluir circuitos de controle que monitoram e regulam a tensão de saída conforme necessário para manter o funcionamento adequado.

4.3.2. Conversor Step-Down

Para Roisenberg (2023), um conversor DC/DC *Step Down*, também conhecido como regulador *buck*, é projetado para converter uma tensão de entrada em corrente contínua (DC) mais alta em uma tensão de saída menor, preservando a mesma polaridade (Figura 21).

Figura 21- Módulo Step-Down



Fonte: Adaptado de Amazon (s.d.)

Ele opera em modo chaveado, utilizando um transistor que liga e desliga em alta frequência para regular a tensão de saída, armazenando energia em um indutor quando ativo e liberando-a quando desligado (Roisenberg, 2023). Ao utilizar um conversor *step-down*, aproveitamos diversos benefícios, destacando-se a eficiência energética como um dos mais importantes. Além disso, sua capacidade de se ajustar a diferentes voltagens faz desses dispositivos ferramentas essenciais para quem trabalha com equipamentos eletrônicos provenientes de fontes diversas (Wesen, s.d.).

4.4. MICROCONTROLADORES

Microcontroladores são basicamente computadores em miniatura desenvolvidos em um único circuito integrado, pois são equipados com unidades de processamento e componentes essenciais para operar de forma autônoma. Entre

esses componentes estão memórias para leitura, escrita de dados e armazenamento de *firmware*, além de conversores de sinais analógico/digital e digital/analógico. Tais dispositivos também possuem portas programáveis de entrada e saída, que possibilitam diversas funcionalidades, como controlar outros dispositivos e proporcionar interação com o usuário (Natanael, 2022).

4.4.1. Surgimento e Características dos Microcontroladores

De acordo com IBM Brasil (2024), os microcontroladores surgiram a partir de avanços na fabricação de microprocessadores, quando pesquisadores desenvolveram técnicas para integrar CPU, memória e componentes periféricos em um único *chip*. Em 1971, os engenheiros Gary Boone e Michael Cochran, da *Texas Instruments*, criaram o primeiro microcontrolador, marcando o início dessa tecnologia. Logo após, empresas como Intel e diversos fornecedores japoneses de eletrônicos começaram a produzir suas próprias versões, expandindo rapidamente o alcance e as possibilidades de uso dos microcontroladores.

Ainda segundo o autor, os microcontroladores de 8 bits são os mais simples, com memória e processamento limitados, sendo ideais para pequenos eletrodomésticos, como brinquedos e controles remotos. Já os de 16 bits, com o dobro da capacidade, são utilizados em aplicações mais complexas, como dispositivos médicos, sistemas automotivos e controles industriais. Os mais avançados, os microcontroladores de 32 bits, destacam-se em tarefas exigentes, como consoles de jogos, dispositivos de entretenimento e automação industrial de alto desempenho.

4.4.2. Diferença entre Microcontrolador e Controlador

Segundo Próspero (2020), um microcontrolador é essencialmente um microprocessador que integra, em um único Circuito Integrado (CI), não apenas a Unidade Central de Processamento (CPU), mas também memória RAM, memória ROM e registradores de entrada e saída. Essa integração permite que o

microcontrolador funcione de maneira autônoma, sem a necessidade de uma Placa Mãe para conectar esses componentes separadamente, como seria o caso em sistemas baseados em microprocessadores tradicionais. Assim, o microcontrolador pode ser visto como um “computador em um único chip”, capaz de executar programas e interagir diretamente com dispositivos externos, como sensores e atuadores, por meio de suas interfaces de entrada e saída. Além disso, é possível conectar componentes complementares, como conexões USB ou módulos de internet, expandindo suas capacidades.

O autor ainda ressalta que, um controlador é um termo mais amplo que se refere a qualquer dispositivo ou sistema projetado para controlar outros dispositivos ou processos. Controladores podem variar desde circuitos simples, como um interruptor que liga e desliga um motor, até sistemas mais complexos que não necessariamente incorporam um microprocessador. A principal distinção reside no fato de que o microcontrolador é uma solução integrada e programável, ideal para aplicações que exigem processamento de dados e controle autônomo, enquanto um controlador pode ser qualquer mecanismo, analógico ou digital, que exerça controle sobre um sistema, independentemente de sua complexidade ou da presença de um processador.

4.4.3. Comparação entre os principais microcontroladores

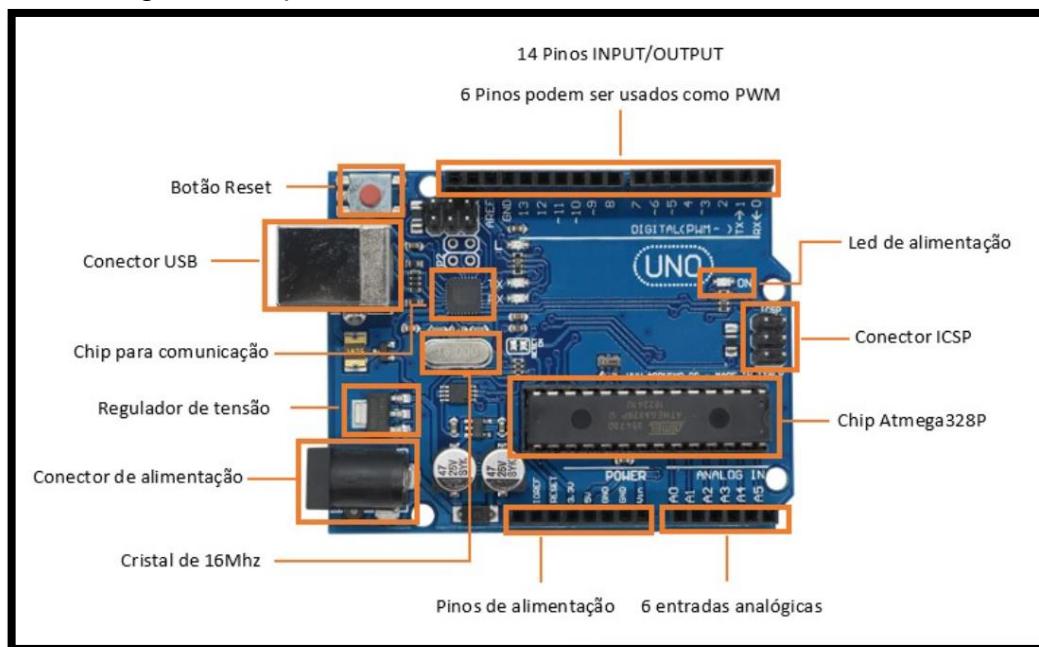
Quando pensamos nos microcontroladores mais populares do mercado, geralmente nos vêm à mente nomes como Arduino, ESP e Raspberry Pi. No entanto, é importante destacar que, tecnicamente, esses dispositivos não são microcontroladores no sentido estrito, como será explicado ao abordarmos cada um deles individualmente. Apesar disso, em uma visão mais ampla, esses dispositivos desempenham um papel fundamental ao permitir que os programas funcionem corretamente e que os circuitos cumpram suas funções, ainda que o trabalho principal seja realizado pelos microcontroladores que estão dentro deles (Próspero, 2020).

4.4.3.1. Arduíno

O Arduino surgiu em 2005, na cidade de Ivrea, na Itália, e recebeu esse nome em homenagem a um bar local onde seus idealizadores costumavam se encontrar. O projeto foi concebido para oferecer aos estudantes do *Interaction Design Institute* Ivrea uma ferramenta simples e econômica, capaz de ajudar tanto novatos quanto profissionais a criar dispositivos interativos usando sensores e atuadores (STA Eletrônica, s.d.).

Conforme Próspero (2020), o Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto (“open source”), cujo projeto está disponível para todos. Ela é composta por quatro elementos principais: a placa propriamente dita (que abriga o microcontrolador), o software de programação (Arduino IDE, um editor de código) e a linguagem de programação, inspirada em C++ (Figura 22).

Figura 22- Diagrama de pinos do Arduino Uno



Fonte: STA Eletrônica (s.d.)

A STA Eletrônica (s.d.) ressalva que, em um mercado repleto de placas como Arduino Pro Mini, Nano, Due, Mega e Leonardo, o Arduino Uno desonta como uma das mais conhecidas para sistemas embarcados, graças à sua IDE interativa e ao vasto conjunto de funções e bibliotecas que simplificam a programação. Sua proposta

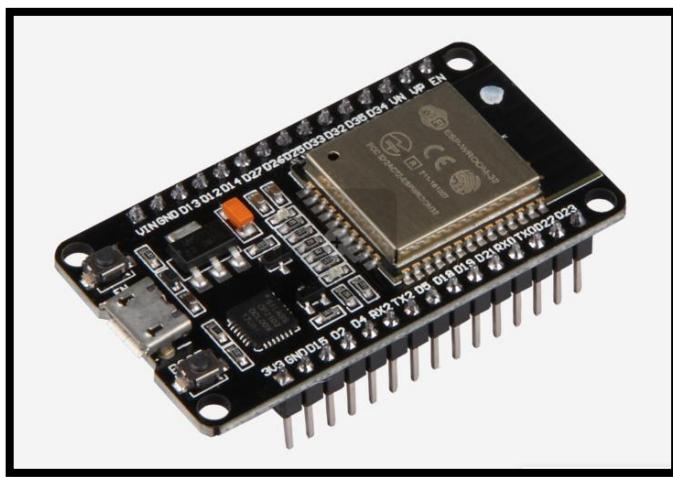
de uso intuitivo e fácil integração de módulos o torna favorito de profissionais, hobistas e programadores, e os constantes avanços, especialmente em aplicações de IoT, ampliam continuamente suas possibilidades em projetos embarcados.

4.4.3.2. ESP32

De acordo com Mello (2023), o ESP32 é uma placa de desenvolvimento de baixo custo e alta performance baseada em um microcontrolador *dual-core* de 32 bits com clock de até 240 MHz, e suporte a 4 MB de memória *flash* interna. O microcontrolador vem integrado de fábrica com conectividade Wi-Fi e Bluetooth 4.2, eliminando a necessidade de módulos externos e se destacando em projetos de Internet das Coisas, automação residencial, robótica e prototipagem.

Os módulos da família ESP são placas com microcontroladores semelhantes aos do Arduino, mas de acordo com a Figura 23 e o Quadro 5, se diferenciam pelo fato de que a maioria deles já inclui conectividade Wi-Fi, o que os torna especialmente vantajosos em aplicações que exigem acesso à Internet (Próspero, 2020).

Figura 23- Construção do ESP32



Fonte: Joy-IT (s.d.)

Característica	ESP32	Arduino Uno
Processador	Dual-core de 32 bits	8 bits
Clock	Até 240 MHz	Até 16 MHz
Conectividade sem fio	Wi-Fi e Bluetooth	Não
Memória	520 KB flash, 80 KB RAM	32 KB flash, 2 KB RAM
Periféricos	Portas GPIO, UART, I2C, SPI	Portas GPIO, UART, I2C

Quadro 5- Vantagens do ESP32 em relação ao Arduino Uno

Fonte: Adaptado de Mello (2023)

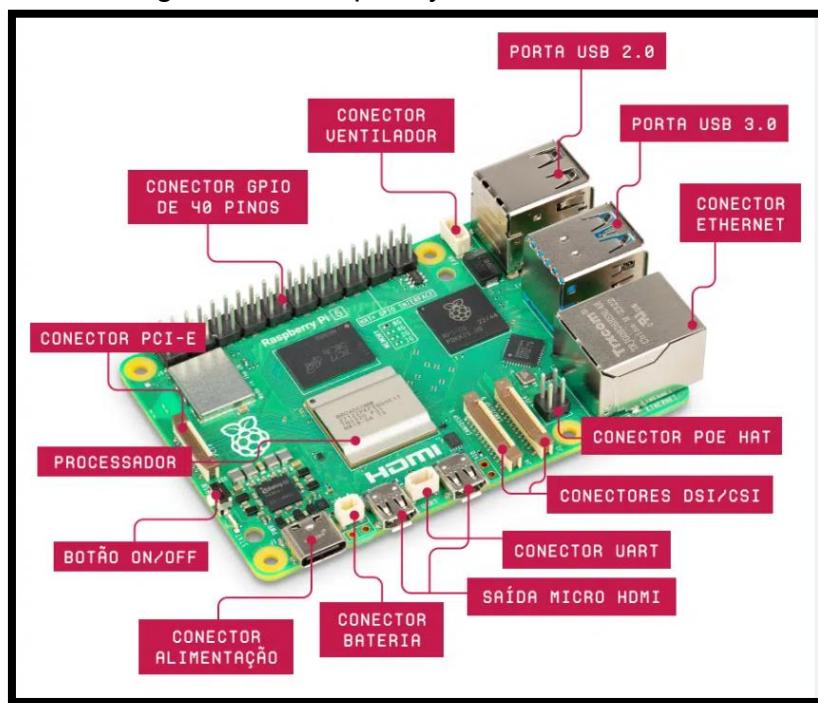
Em resumo, o ESP32 destaca-se em relação ao Arduino Uno ao oferecer um processador *dual-core* de 32 bits rodando a até 240 MHz, o que garante maior velocidade e eficiência, além de 520 KB de memória flash e 80 KB de RAM, superando a capacidade de armazenamento do Uno. Sua conectividade Wi-Fi e Bluetooth amplia as possibilidades de comunicação com outros dispositivos e com a Internet, enquanto a variedade de periféricos (GPIO, UART, I²C e SPI), confere versatilidade para diferentes aplicações. Operando a 3,3 V, a ESP32 mantém compatibilidade de tensão com outras placas como Raspberry Pi e Arduino Due, em contraste com os 5 V do Uno. Porém, toda essa sofisticação implica maior complexidade de uso, exigindo do desenvolvedor mais atenção ao explorar seus recursos avançados (Mello, 2023).

4.4.3.3. Raspberry Pi

Lançada em 2012, a Raspberry Pi foi inicialmente idealizada como um recurso didático para facilitar o ensino de programação e de *hardware* em ambientes escolares e em grupos de desenvolvedores. Rapidamente, porém, ela conquistou grande adesão graças à versatilidade de uso, permitindo desde atividades básicas de codificação e experimentos eletrônicos até a implementação de projetos avançados, como sistemas de automação, servidores e estações multimídia (Makerhero, s.d.).

Podemos ver na Figura 24, que o Raspberry Pi se destaca dos demais por ser um verdadeiro computador em miniatura com microcontrolador integrado, oferecendo mais memória RAM e armazenamento, maior velocidade de processamento e capacidade multitarefa, ao contrário do Arduino, que só executa um programa por vez (Próspero, 2020).

Figura 24- Características gerais da Raspberry Pi



Fonte: Makerhero (s.d.)

Contudo, isso não o torna superior ao Arduino ou ao ESP, já que cada plataforma atende a finalidades distintas: em projetos com circuitos simples, o Arduino é mais indicado, pois funciona sem exigir um sistema operacional, o que torna o uso do Raspberry Pi mais complexo (Próspero, 2020).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e métodos empregados no desenvolvimento do trabalho, abordando as definições relacionadas ao tipo de pesquisa adotado, o processo de elaboração do projeto, a construção do protótipo, suas conexões elétricas, a lógica de controle implementada e a interface de usuário desenvolvida.

5.1. DEFINIÇÃO DO TIPO DE PESQUISA

Este trabalho tem como objetivo idealizar, construir e programar um protótipo de chocadeira microcontrolada onde o usuário configura previamente os parâmetros de ambiente com a finalidade de garantir uma incubação totalmente automática e, baseado nos dados dos sensores, assegurar sempre um ambiente ideal para a choca durante o período de incubação até o nascimento, fazendo com que o pintainho ecloda no período correto e não grude na casca.

Com base nisso, os métodos de pesquisa que se caracterizam com esse trabalho são o método qualitativo e o quantitativo. Conforme Pitanga (2020), a pesquisa qualitativa é um método de investigação que entende fenômenos complexos e subjetivos por meio da coleta e da análise de dados não numéricos. O projeto pode combinar ambos os métodos. A parte qualitativa envolve a compreensão dos requisitos e funcionamento da chocadeira, o projeto é qualitativo porque leva em consideração todos os requisitos técnicos e funcionais necessários para criar um ambiente de incubação ideal. Inicialmente, foi realizada uma revisão abrangente da literatura e análise de documentos relacionados a atuadores, sensores e microcontroladores.

Ao realizar esta pesquisa qualitativa, foi possível identificar as melhores práticas e alternativas possíveis, que podem ser adaptadas às especificações do projeto. A análise bibliográfica contribuiu para a compreensão de como diversas variáveis, tais como umidade e temperatura, influenciam na incubação dos ovos e

como essas variáveis podem ser controladas com sucesso utilizando os recursos implementados.

Pitanga (2020) ressalta que a pesquisa quantitativa é caracterizada como um método de investigação fundamentado na coleta e análise de dados numéricos, sendo aplicada para a identificação de padrões, a validação de hipóteses e a realização de previsões. Essa abordagem revela-se essencial para o presente trabalho, uma vez que permite o monitoramento e a análise sistemática de variáveis críticas, como temperatura e umidade, a partir de dados coletados por sensores, assegurando o monitoramento e controle das condições de incubação.

No experimento, sensores de temperatura e umidade foram integrados ao microcontrolador ESP32, possibilitando a coleta contínua e o monitoramento em tempo real do ambiente interno da chocadeira. Os dados coletados foram submetidos a diversas comparações por segundo, o que possibilitou analisar suas variações ao longo do tempo e ajustar as condições usando controle PID para a temperatura e relés para a umidade, de modo a mantê-los dentro da faixa ideal para uma incubação eficiente dos ovos.

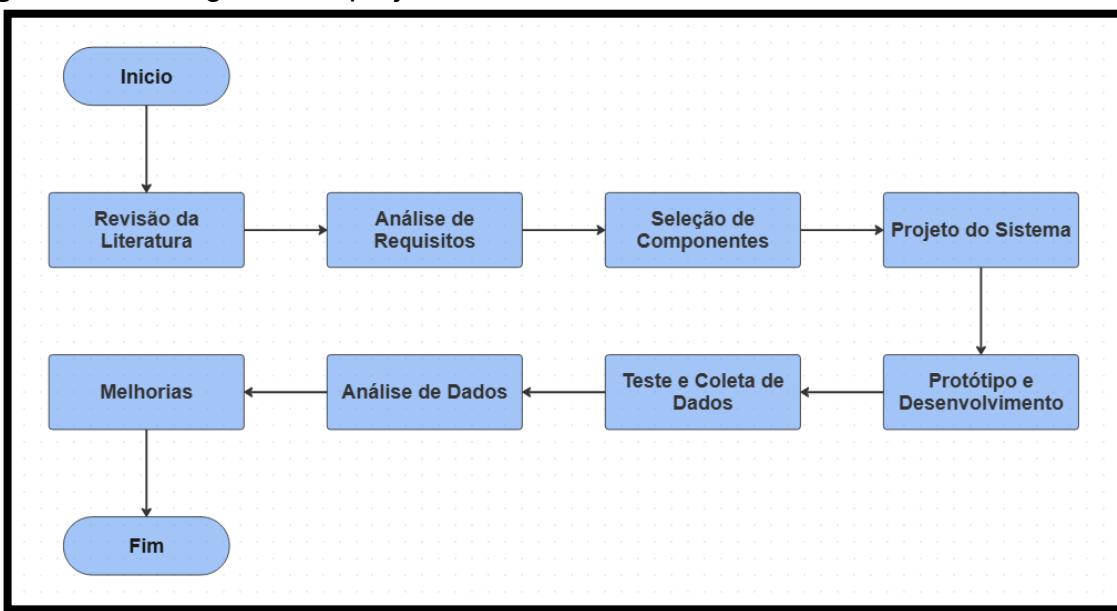
Além disso, este estudo é classificado como um tipo de pesquisa experimental, uma vez que envolve o desenvolvimento e teste de um protótipo de *software* e *hardware*. O objetivo da pesquisa é testar a qualidade da simulação de ambiente no interior de uma chocadeira microcontrolada. Garantindo uma repetição de padrões para a confiabilidade dos resultados e um maior controle das informações coletadas, o que leva a um melhor gerenciamento de dados (Mettzer, 2018).

Por fim, o projeto se enquadra como uma técnica de pesquisa baseada em análise documental e estudo de caso. A análise documental engloba a revisão de documentos técnicos, e outras fontes que detalham componentes e métodos utilizados. Já o estudo de caso investiga detalhadamente o funcionamento do projeto finalizado, avaliando sua eficácia e possíveis melhorias.

5.2. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A Figura 25 apresenta um fluxograma que ilustra o processo de elaboração e desenvolvimento do projeto, proporcionando uma visão geral das etapas realizadas.

Figura 25- Fluxograma do projeto



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica abrangente sobre diversos sensores, atuadores, microcontroladores e demais componentes que integram o protótipo. Com base nessa pesquisa, procedeu-se à aquisição de todos os materiais e componentes eletrônicos necessários para a construção do protótipo.

Na sequência, deu-se início à etapa de marcenaria, voltada à confecção da estrutura física da incubadora, a qual foi projetada com três compartimentos distintos: um destinado à geração de umidade, outro à câmara de incubação propriamente dita, e um terceiro reservado para o alojamento dos componentes eletrônicos.

Por fim, após a montagem de um protótipo funcional (composto pelos módulos de controle de umidade, temperatura e sistema de viragem automática da bandeja), e a conclusão do desenvolvimento da interface de usuário, bem como de toda a parte elétrica e eletrônica, iniciou-se o processo de incubação propriamente dito.

5.3. CONSTRUÇÃO DA INCUBADORA

Toda a parte estrutural da chocadeira foi confeccionada a partir de uma placa de MDF (*Medium Density Fiberboard* ou chapa de fibra de madeira de media densidade), nas dimensões de 2,4 metros de comprimento por 1,8 metros de altura.

As chapas que compõem a estrutura da incubadora foram cortadas em várias partes que quando juntas formam o protótipo por completo. Para uma melhor descrição do equipamento, a chocadeira foi apresentada conforme suas diferentes perspectivas: vista frontal, superior, lateral direita, lateral esquerda e traseira. Além disso, são detalhados seus compartimentos internos, tais como: a câmara de ambiente, a parte inferior da câmara de incubação, o compartimento do umidificador e, por fim, o compartimento que abriga os componentes eletrônicos responsáveis pela lógica de controle.

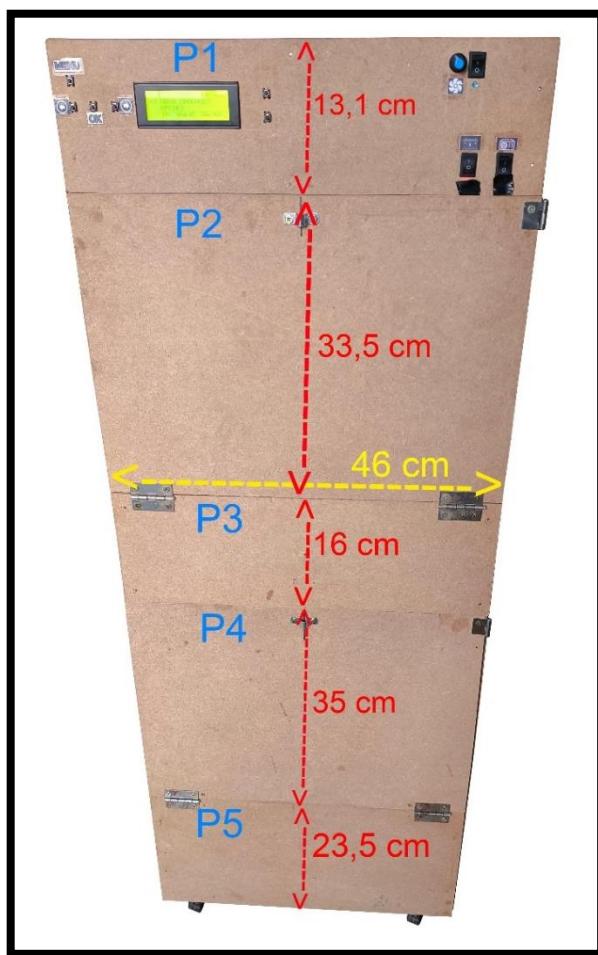
5.3.1. Parte Frontal

A parte frontal da chocadeira é composta pelo painel de interface de usuário, no qual é possível programar todos os parâmetros ambientais necessários para a incubação de diferentes espécies de animais ovíparos. O painel conta com botões destinados à interação com o sistema, sendo eles: *Menu*, Direita/Incrementar, Esquerda/Decrementar e *OK*. Além disso, na lateral direita do display, há dois botões adicionais: um botão inferior configurável e, na parte superior, o botão *Reset*.

Também foi incorporado ao sistema um potenciômetro responsável pelo controle dos ventiladores (*fans*), cuja função é promover a circulação do ar na parte superior da chocadeira. Essa região abriga os componentes lógicos e eletrônicos responsáveis pelo controle dos sensores e atuadores do sistema.

Por fim, na parte inferior direita do painel de interface, estão localizados dois botões com funções específicas: o botão da direita é responsável por acionar as fontes de alimentação da chocadeira (5 V e 3 V), enquanto o botão da esquerda estabelece a conexão do microcontrolador com a bateria da incubadora, assegurando a continuidade do processo de incubação em situações de interrupção no fornecimento de energia elétrica da rede (Figura 26).

Figura 26- Visão Frontal da Chocadeira



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

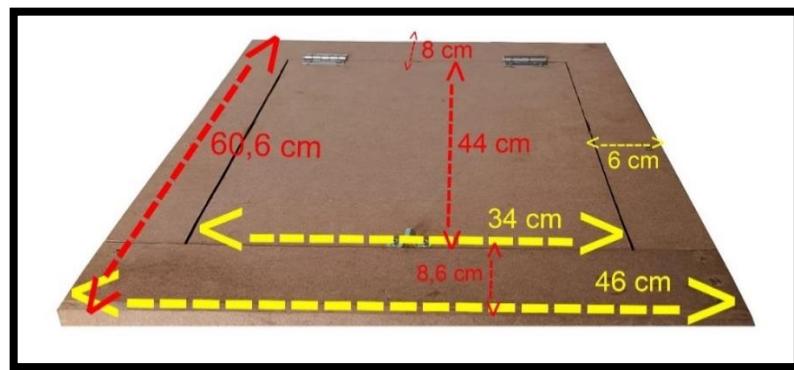
Ainda com base na Figura 26, identifica-se a parte P2 como sendo a porta da câmara de ambiente, local onde ocorre o processo de incubação durante a choca. A descrição detalhada dessa câmara será apresentada na Seção 5.3.6.

A parte P3 corresponde a uma estrutura fixa cuja principal função é sustentar a plataforma de suporte dos ovos. Já a parte P4 refere-se à porta que permite o acesso ao sensor localizado abaixo da plataforma de ovos, à entrada de umidade e, eventualmente, aos pintainhos que possam ter caído da plataforma após a eclosão. Por fim, a parte P5 trata-se de uma estrutura fixa, assim como a P3, cuja função é exclusivamente estrutural, não exercendo nenhuma outra finalidade no sistema.

5.3.2. Parte Superior

Como pode-se observar na Figura 27, a parte superior da incubadora é composta, essencialmente, por uma moldura que pode ser fixa ou removível. No interior dessa moldura, encontra-se uma porta que, ao ser aberta, possibilita a visualização da maior parte dos componentes responsáveis pela lógica de funcionamento da chocadeira.

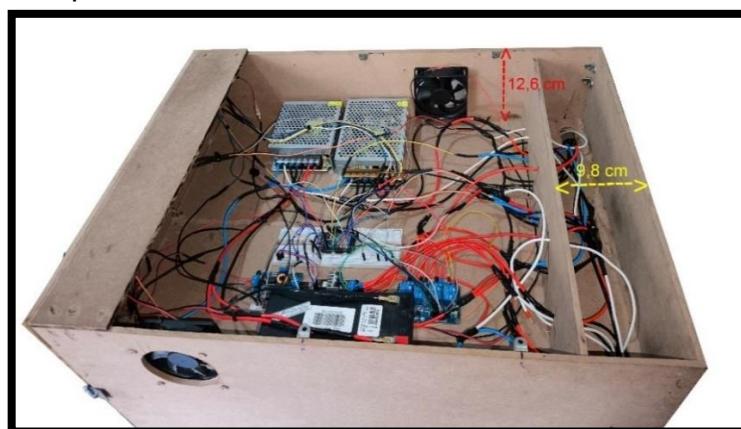
Figura 27- Visão Superior da Chocadeira



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

No entanto, conforme a Figura 28, para o manuseio adequado dos fios provenientes da parte inferior da incubadora, recomenda-se a remoção completa da moldura. Essa ação permite um melhor acesso e ângulo de trabalho, facilitando procedimentos como a decapagem de fios, a realização de conexões elétricas ou a verificação de voltagens.

Figura 28- Visão Superior Interna da Chocadeira



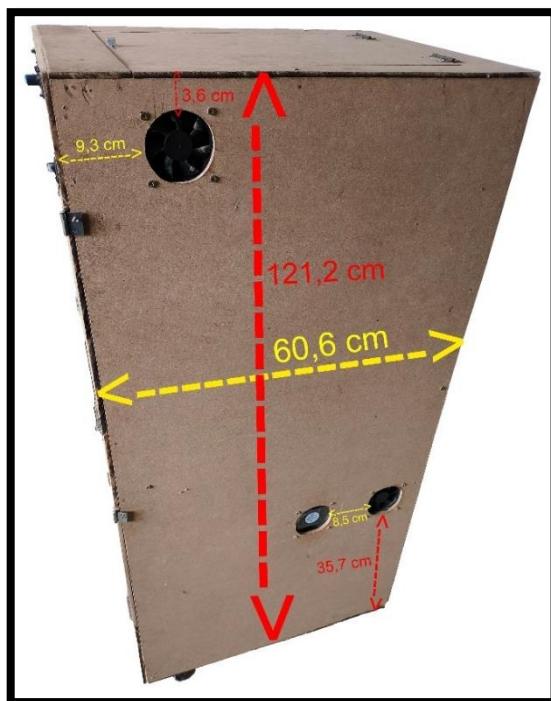
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Constata-se que a retirada da moldura proporciona um espaço de trabalho ampliado, o que facilita a identificação e resolução de possíveis falhas no circuito, a implementação de modificações e a realização de limpezas preventivas. Essa medida contribui para a minimização de riscos de danos ou mau contato nas conexões elétricas.

5.3.3. Parte Direita

Na face lateral direita da incubadora, especificamente no canto superior esquerdo, está instalado um ventilador (*fan*) cuja função é injetar ar na parte superior da chocadeira que abriga os componentes eletrônicos e as fontes de alimentação do sistema (Figura 29).

Figura 29- Lateral Direita da Chocadeira



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

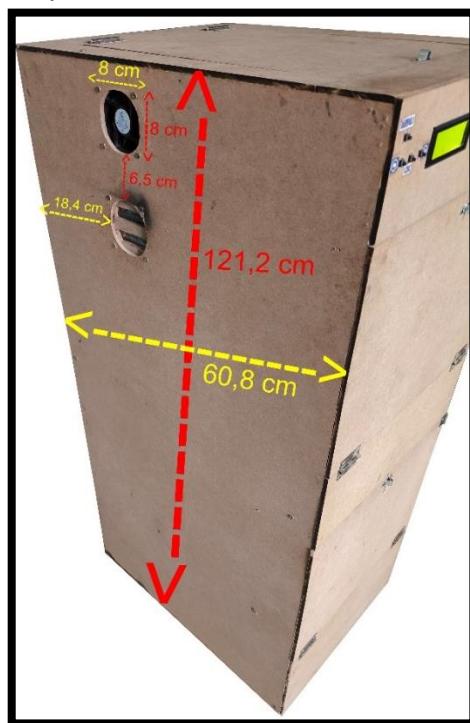
Na parte inferior do protótipo, estão posicionados dois ventiladores adicionais (*fans*). O ventilador localizado à esquerda é responsável pela exaustão do ar da

porção inferior da câmara de incubação, sendo acionado quando a função de renovação do ar é ativada por meio do menu do sistema. Em contrapartida, o ventilador à direita tem a função de injetar ar no compartimento de evaporação, responsável pela geração de umidade para a câmara de incubação, conforme será detalhado no tópico 5.3.8.

5.3.4. Parte Esquerda

Na lateral esquerda da incubadora, conforme ilustrado na Figura 30, podem ser observadas as duas aberturas destinadas à instalação dos ventiladores (*fans*). O posicionamento dessas ventoinhas foi estrategicamente planejado, de modo que a *fan* superior esteja disposta em um eixo horizontal oposto à *fan* localizada na lateral direita do protótipo. Essa configuração permite a entrada de ar frio em um dos cantos do compartimento superior e a saída de ar quente pelo canto oposto, favorecendo uma circulação de ar eficiente no interior da câmara superior da incubadora.

Figura 30- Visão Lateral Esquerda da Chocadeira



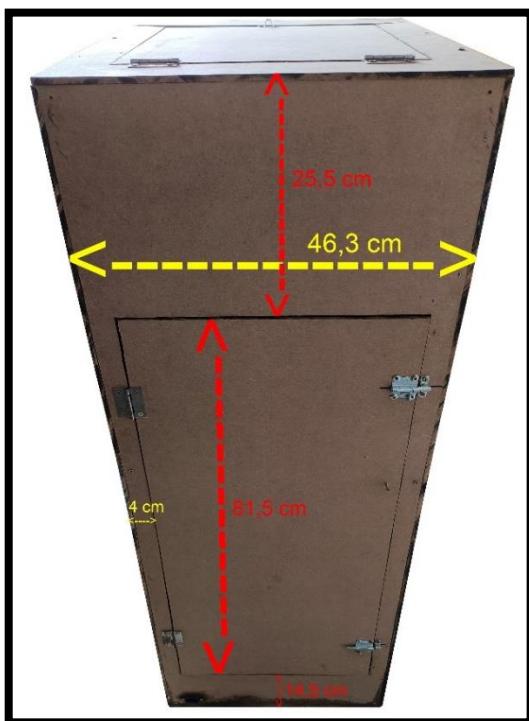
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

No caso da abertura inferior da lateral esquerda, trata-se de uma passagem para a saída de ar quente. Ao invés da instalação de um ventilador nesse local, foi projetada uma abertura permanente que possibilita a liberação do ar aquecido, promovendo a renovação do ar no interior da câmara de incubação. Neste contexto, o ar quente é expelido por essa abertura, enquanto o ar frio entra pela *Fan* esquerda inferior da lateral direita, estabelecendo um fluxo contínuo e controlado. Essa dinâmica proporciona um ambiente termicamente equilibrado, simulando de maneira mais fiel possível as condições naturais de incubação.

5.3.5. Parte Traseira

Na parte posterior da incubadora, encontra-se uma única chapa de madeira contendo um compartimento central. Esse compartimento foi projetado com o objetivo de facilitar o acesso e a manutenção do sistema de umidificação, do servo motor e dos componentes do reservatório de água utilizados no projeto (Figura 31).

Figura 31- Parte Traseira da Chocadeira



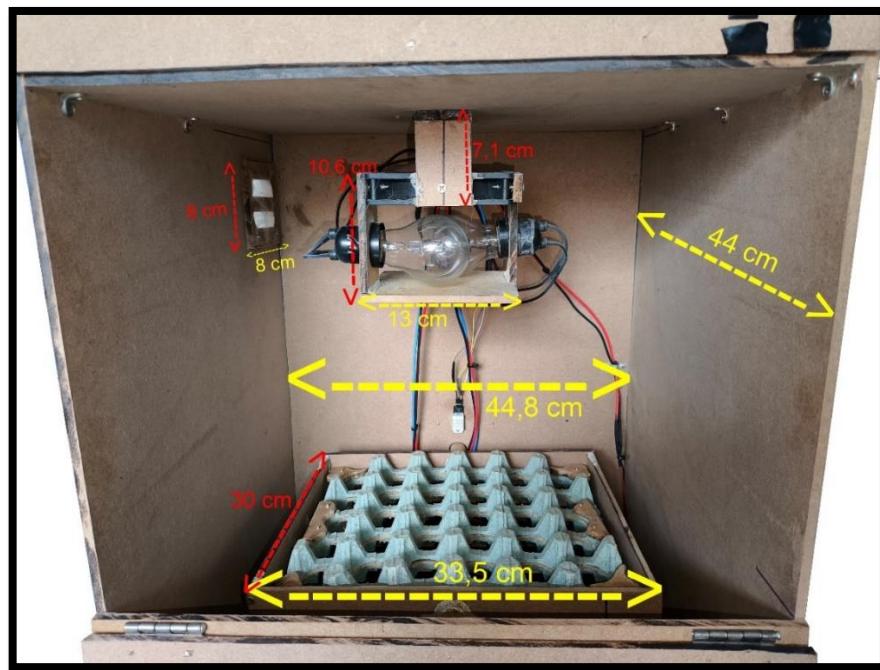
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

No canto inferior esquerdo está a entrada de energia, utilizando o mesmo padrão de conexão empregado em fontes de alimentação de computadores. A escolha dessa posição foi planejada para minimizar interferências no espaço onde a chocadeira estiver instalada, uma vez que, ao posicionar o cabo de alimentação nessa região, ele permanece mais oculto, reduzindo o risco de acidentes, como tropeços ou danos ao fio.

5.3.6. Câmara de Ambiente

A Câmara de Ambiente constitui a principal e mais relevante parte da incubadora, pois é responsável por garantir a distribuição uniforme da temperatura e da umidade em toda a extensão da bandeja (Figura 32).

Figura 32- Visão Interna da Câmara de Incubação



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

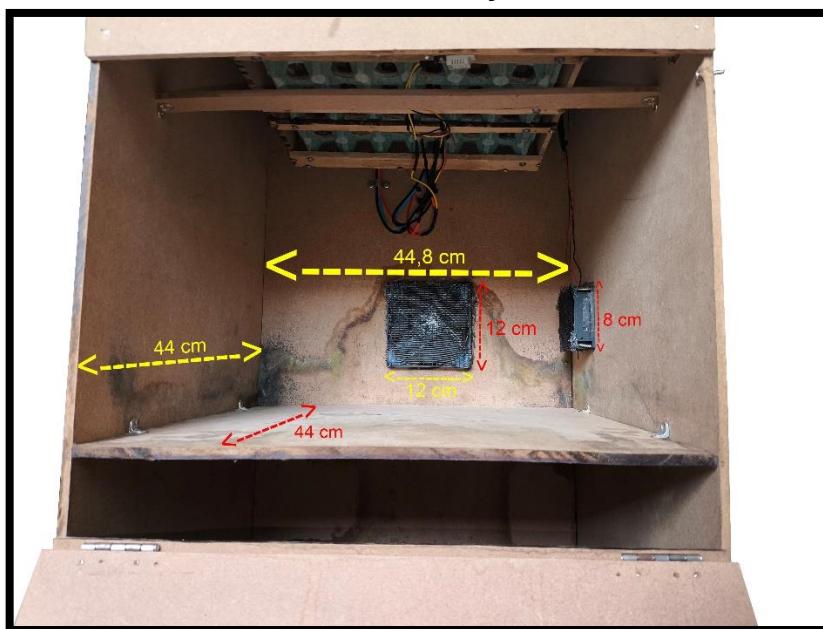
A câmara de incubação é composta, entre outros elementos, pela saída de ar quente já descrita na seção “Lateral Esquerda”. Essa câmara abriga também o módulo de aquecimento, constituído por duas lâmpadas incandescentes e um ventilador (*fan*), cujos detalhes serão abordados na seção 5.4.1. Além disso, estão instalados dois

sensores DHT22, responsáveis pela medição de temperatura e umidade relativa do ar (sendo um posicionado acima da plataforma de ovos e o outro abaixo). Por fim, a plataforma de ovos é acoplada a um eixo conectado a um servo motor, responsável pelo mecanismo de viragem automática.

5.3.7. Parte Inferior da Câmara de Incubação

Conforme mostrado na Figura 33, a parte inferior da câmara de incubação situa-se abaixo da plataforma de ovos. Nessa área, encontra-se o sensor DHT22 posicionado embaixo da plataforma, além de um ventilador de 12 cm destinado à sucção da umidade vinda de seu respectivo compartimento e de um ventilador de 8 cm responsável pela renovação do ar no interior da câmara.

Figura 33- Parte Inferior da Câmara de Incubação



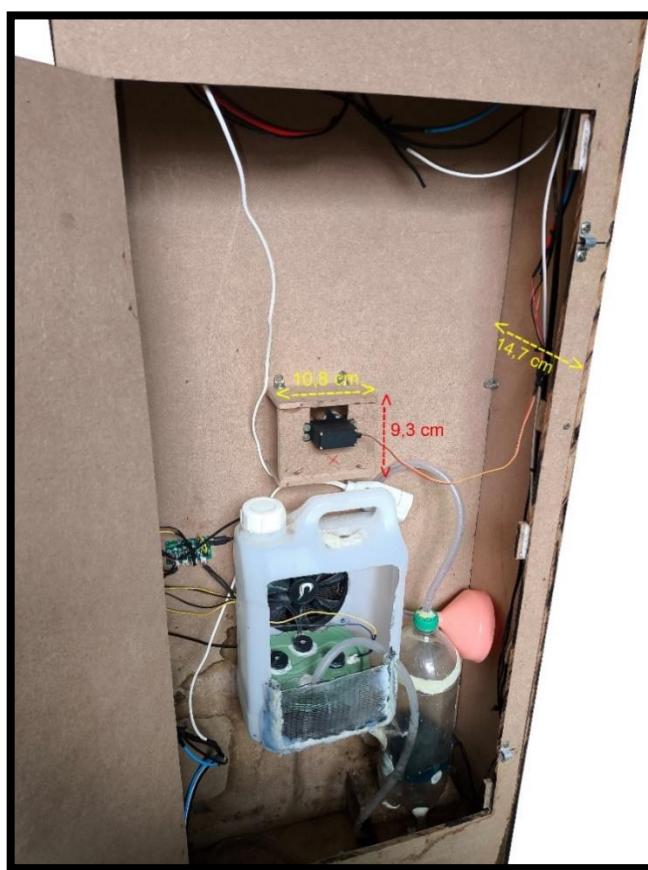
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A chapa de madeira que compõe o fundo deste compartimento tem a função de evitar a queda de pintainhos. Caso isso venha a ocorrer, além de servir como base para a possível instalação de uma segunda plataforma de ovos, similar à existente na parte superior. Essa modificação possibilita a ampliação da capacidade do protótipo, elevando o número de ovos suportados de 30 para 60 unidades.

5.3.8. Compartimento do Umidificador

O compartimento destinado ao umidificador abriga tanto o sistema de controle de umidade quanto o servo motor responsável pela movimentação periódica da plataforma de ovos (Figura 34).

Figura 34- Compartimento Interno Traseiro da Chocadeira



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Esse espaço permite o reabastecimento do reservatório de água, que alimenta os evaporadores ultrassônicos, além de proporcionar fácil acesso para a realização de manutenções nos componentes ali instalados.

5.4. MÓDULOS DA INCUBADORA

Na presente Seção, denomina-se "módulo" o conjunto de componentes e conexões eletrônicas que, integrados, desempenham uma função específica dentro do protótipo. Os módulos presentes podem ser classificados, de forma geral, em três categorias: Módulo de Umidade, Módulo de Aquecimento e Módulo de Viragem da Plataforma. Todos esses sistemas são gerenciados pelo microcontrolador ESP32, em conjunto com os módulos lógicos de controle.

5.4.1. Módulo de Aquecimento

Conforme destacado por Kok (2011), uma incubadora deve ser capaz de fornecer condições térmicas semelhantes às proporcionadas por uma galinha choca, a qual mantém os ovos aquecidos por meio de seu calor corporal. Com base nessa premissa, o Módulo de Aquecimento foi desenvolvido com o objetivo de elevar gradualmente a temperatura da câmara de incubação, aproveitando ao máximo o calor gerado pelas lâmpadas (Figura 35).

Figura 35- Módulo de Aquecimento

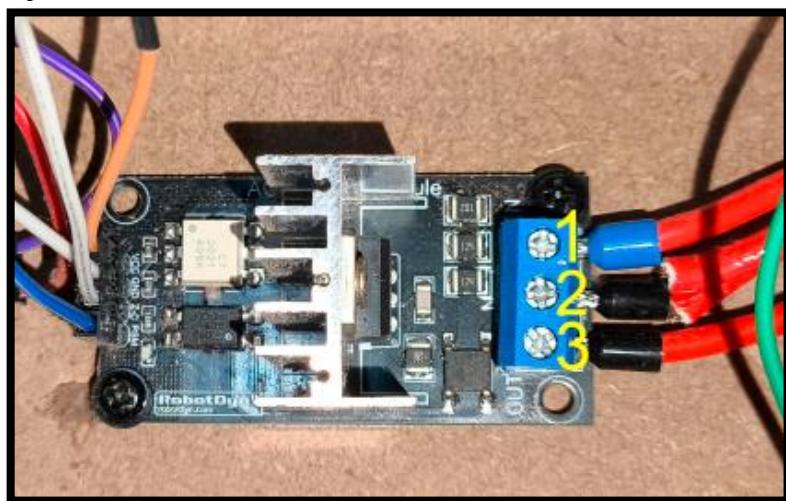


Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A construção deste módulo consiste no posicionamento de duas lâmpadas halógenas com potência individual de 120W (uma em cada lado do ventilador), que possui dimensões de 12 centímetros quadrados.

As lâmpadas foram dispostas de modo que o ventilador direcione ar continuamente sobre elas, promovendo a máxima troca de calor e conduzindo o ar aquecido para baixo, onde está fixada a plataforma de ovos. Na Figura 36, apresenta-se as conexões elétricas deste módulo.

Figura 36- Ligações do Módulo AC Dimmer



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O módulo é um AC Dimmer 8A-400V da marca RobotDyn e, para melhor explicação foram numerados de 1 a 3 os polos de conexão alternada responsáveis pela alimentação das lâmpadas. O primeiro fio foi ligado diretamente à rede elétrica de 110 V na fase.

A segunda ligação uniu o neutro da rede elétrica ao neutro das duas lâmpadas e foi conectada ao módulo conforme demonstrado na Figura 36. A terceira conexão constitui-se da saída da fase já dimerizada, à qual foi ligada a fase das lâmpadas. As ligações dos terminais positivo e negativo do módulo foram obtidas diretamente da fonte de 3.3 V do protótipo, e as conexões destinadas ao microcontrolador ESP32 foram apresentadas na Seção 5.5.1.

5.4.2. Módulo de Movimentação da Plataforma

Segundo Cobb (2020), o ato de virar os ovos durante a incubação é essencial para impedir que o embrião se prenda às membranas internas da casca, o que favorece o seu desenvolvimento adequado. O desenvolvimento da plataforma pode ser dividido em duas etapas principais.

A primeira etapa corresponde à construção da estrutura da plataforma e sua fixação no interior da câmara de incubação (Figura 37). A segunda etapa refere-se ao acoplamento do servo motor, responsável pela movimentação periódica da plataforma.

Figura 37- Estrutura da Plataforma de Ovos



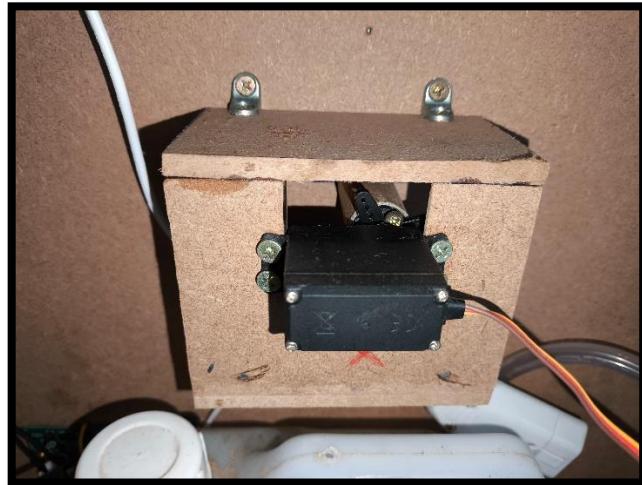
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A plataforma foi construída utilizando duas bandejas de ovos dispostas verticalmente e coladas uma à outra de forma invertida, com a parte central removida a fim de preservar apenas os contornos moldados para acomodar os ovos de maneira adequada. Com base nessa estrutura, foi confeccionada uma caixa ao redor da bandeja, permitindo sua fixação centralizada.

Essa moldura adicional teve como finalidade a criação de um eixo de suporte, responsável tanto por manter a plataforma fixada no centro da câmara quanto por possibilitar sua conexão ao servo motor, viabilizando o movimento periódico da estrutura. Por fim, foi adicionado um suporte de madeira na parte frontal da câmara,

com o objetivo de reforçar a estabilidade de todo o conjunto. A Figura 38 apresenta a fixação do servo motor no sistema.

Figura 38- Fixação do Servo Motor



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Para a fixação do Servo Motor 996R da marca Metal Gear foi elaborado uma espécie de caixa que faz a fixação na ponta do eixo de transmissão da plataforma de ovos. A ligação foi feita utilizando uma ponteira de 4 pontos de fixação que vem junto com o servo e entre os pontos foi colocado 4 parafusos, então o servo força os parafusos fazendo girar a bandeja de ovos.

5.4.3. Módulo de Umidade

De acordo com Decuypere (1992), para que se obtenham melhores resultados ao término do processo de incubação, é necessário manter a umidade relativa do ar dentro da câmara de incubação entre 50% e 65%. O módulo de umidade do protótipo foi elaborado em partes, sendo elas: os Evaporadores Ultrassônicos, o Compartimento de Injeção de Umidade e o Tanque D'Água com Bomba Elétrica e Filtro.

Primeiramente na Figura 39, mostra-se a construção do recipiente onde ficou acoplado os 3 evaporadores ultrassônicos que são responsáveis por manter a câmara de incubação no nível de umidade previamente programado.

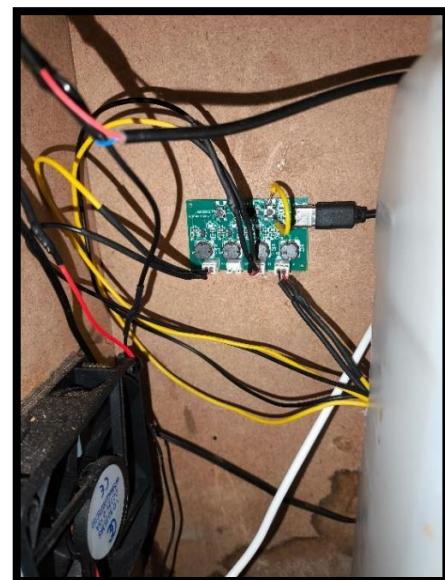
Figura 39- Recipiente dos Evaporadores Ultrassônicos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Os evaporadores ultrassônicos foram acoplados a um reservatório destinado ao armazenamento de água, o qual é mantido constantemente em nível adequado por meio de uma bomba d'água. Cada evaporador realiza a captação da água através de um tubo confeccionado com material poroso, permitindo a absorção capilar do líquido. Esses tubos são conectados individualmente ao módulo mostrado na Figura 40.

Figura 40- Módulo de Controle dos Evaporadores Ultrassônicos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Nesse módulo foi elaborado um *jumper* soldando um fio nas duas extremidades do botão de acionamento para deixar o módulo ligado toda vez que ele recebe energia. O módulo possui ainda 4 entradas para 4 evaporadores ultrassônicos individuais, porém no projeto usou-se apenas 3.

No que diz respeito à alimentação elétrica, a fonte utilizada no sistema fornece uma tensão de 5 V ao módulo relé. Quando o acionamento do sistema de umidade é necessário, o microcontrolador envia um sinal de controle ao relé, que, por sua vez, permite a passagem dos 5 V para o módulo responsável pela ativação dos evaporadores ultrassônicos. A Figura 41 apresenta o tanque d'água, responsável por manter o suprimento contínuo de água para os evaporadores.

Figura 41- Tanque D'Água com Bomba e Filtro



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Na Figura 41, podem-se visualizar o tanque d'água adaptado de uma garrafa pet com capacidade de 2 litros. O tanque possui um filtro para proteger a bomba d'água de sujeira, pois pode ser facilmente travada por qualquer sujeira que passe pelo tubo. O tanque também foi equipado com um sensor de nível que protege a bomba caso o nível d'água fique muito baixo, pois se chegar a secar o tanque e a bomba permanecer ligada pode acontecer um superaquecimento e até a queima do componente.

Na Figura 42, pode-se visualizar o sistema por completo, inclusive com os evaporadores ultrassônicos no compartimento de injeção de umidade e conectados a mangueira do tanque d'água.

Figura 42- Sistema de Umidade por Completo



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

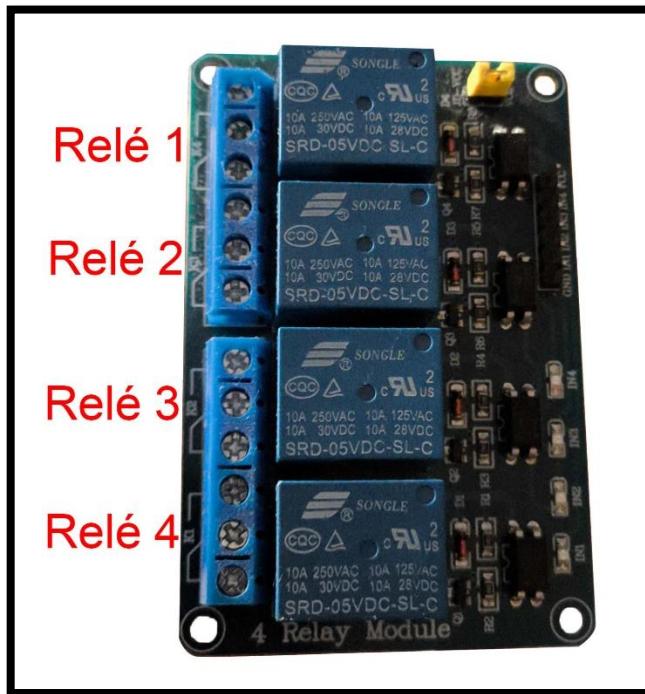
Por fim, o sistema de umidade completo é composto pelo recipiente dos evaporadores instalado dentro do compartimento de injeção de umidade, que inclui um ventilador (*Fan*) responsável por direcionar a umidade à parte inferior da câmara de incubação. Além disso, o tanque d'água mantém constantemente cheio o nível de água do recipiente dos evaporadores durante todo o processo de choca, garantindo o funcionamento integral do sistema de umidade.

5.4.4. Controle do Módulo de Umidade

Com o objetivo de garantir um controle preciso e de alta confiabilidade do sistema de umidificação, foi utilizado um módulo de relés com quatro canais. Esse

módulo é conectado diretamente ao microcontrolador ESP32, permitindo a implementação de uma programação personalizada, adaptada às necessidades específicas de funcionamento do protótipo (Figura 43).

Figura 43- Construção e Conexões do Módulo Relé



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A adoção desse módulo de relés possibilitou a implementação da programação responsável pelo controle dos seguintes componentes: a bomba d'água, o sistema de troca de ar e do módulo de umidade. As conexões elétricas entre o módulo de relés e o microcontrolador serão detalhadas nas seções posteriores no Quadro 6.

5.5. CONEXÕES ELÉTRICAS E LÓGICA DE CONTROLE

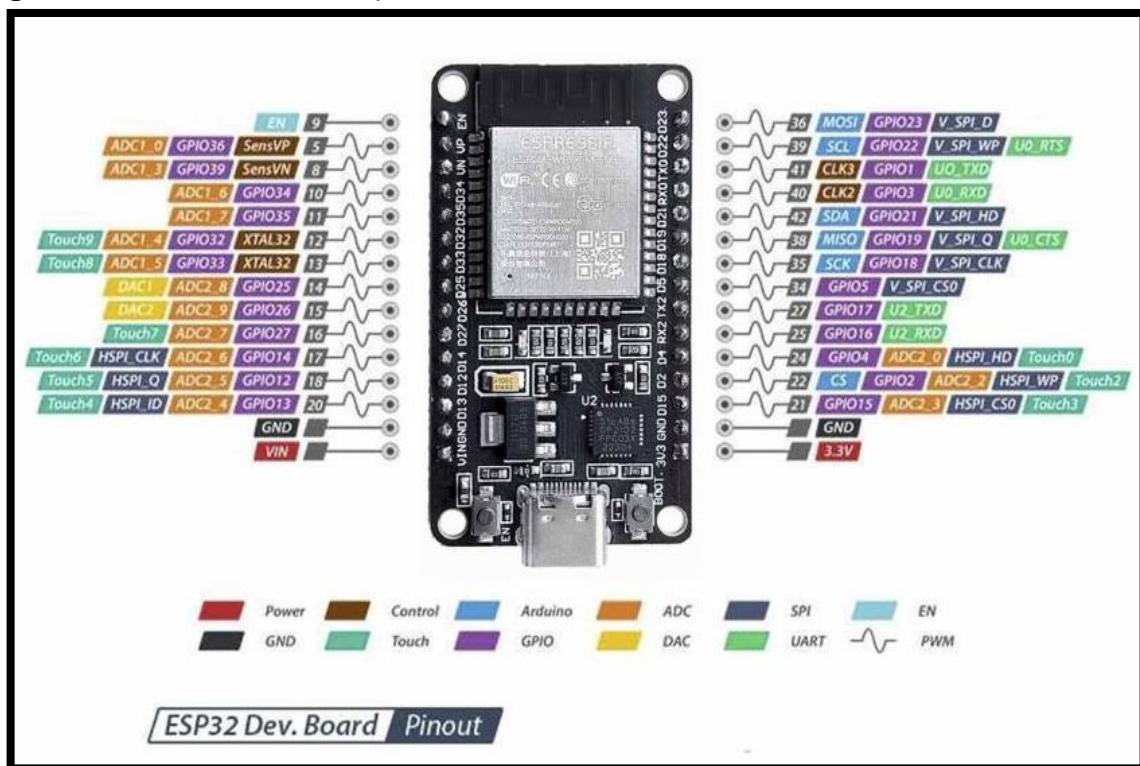
Nesta seção, foram abordados os critérios de escolha do microcontrolador ESP32, suas portas lógicas e as conexões elétricas com os módulos e componentes da chocadeira, incluindo uma tabela ilustrativa. Também foi descrito o processo de programação, com destaque para a implementação e sintonia do controlador PID. Além disso, foram apresentadas as fontes de alimentação utilizadas, suas respectivas

ligações e a distribuição de energia entre os componentes. Por fim, detalharam-se os botões de controle da interface, suas funções, o diagrama de blocos do sistema e a pré-configuração adotada para a incubação de ovos de galinha.

5.5.1. Microcontrolador ESP32

A escolha do microcontrolador ESP32 foi dada principalmente por ser um *dual core* com capacidade de processamento de 240 MHz, que para título de comparação, um concorrente como o Arduino ART MEGA 2560 opera somente a 16MHz. Para acionar o Controle PID junto ao módulo *AC Dimmer*, precisamos do microcontrolador com maior poder de processamento. Na Figura 44 visualizam-se todas as conexões disponíveis para o nosso modelo de microcontrolador escolhido.

Figura 44- Conexões do Esp32



Fonte: Curto Circuito (s.d.)

Com base nas conexões disponíveis do microcontrolador ESP32, foram realizados diversos testes com diferentes combinações de entradas, uma vez que há

várias restrições quanto à compatibilidade de determinados componentes eletrônicos com algumas de suas portas. Ao término desse processo experimental, foi definida a configuração mais adequada, apresentada no Quadro 6, que representa a melhor combinação possível de portas para os componentes eletrônicos empregados no protótipo.

Pinos ESP32	Nome da Conexão	Eletrônico Conectado
22	SLC	Tela I2C 20x4 LCD
21	SDA	Tela I2C 20x4 LCD
14	SINAL_SERVO	Servo Motor MG996R
4	PSM	Módulo AC Dimmer
13	Z-C	Módulo AC Dimmer
18	SINAL_NÍVEL	Sensor Nível D'Água
34	B_ESC	Botão ESC
19	B_<	Botão <
25	B_>	Botão >
23	B_OK-MENU	Botão Ok / Menu
2	BUZZER_BEEP	Buzzer Beep
32	R_BOMBA	Relé de Bomba D'Água
27	R_TROCA_AR	Relé de Troca de Ar
26	R_VENT_GALÃO	Relé da Ventoinha do Evaporador
33	R_ULTRASSÔNICO	Relé dos Evaporadores Ultrassônicos
5	DHT22.1	Sensor DHT22 Superior
15	DHT22.2	Sensor DHT22 Inferior

Quadro 6- Conexões do microcontrolador com os módulos e componentes eletrônicos

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Com base no Quadro 6 é possível visualizar todas as conexões elétricas estabelecidas entre o microcontrolador ESP32 e os diversos componentes e módulos utilizados no protótipo. Entre os dispositivos conectados estão: a tela LCD I2C 20x4, o servo motor MG996R, o módulo AC Dimmer, o sensor de nível d'água, os botões de controle (ESC, <, > e OK/Menu), o buzzer sonoro, os módulos relé (responsáveis pela bomba d'água, troca de ar, ventilador do evaporador e os evaporadores ultrassônicos), além dos sensores DHT22 posicionados acima e abaixo da plataforma de ovos.

O modelo de conexão apresentado no Quadro 6 está organizado em três colunas para facilitar a compreensão. A primeira coluna indica as portas do ESP32 utilizadas, a segunda especifica o tipo de conexão que está sendo estabelecida e a terceira coluna identifica o componente eletrônico conectado à respectiva porta. Essa

estrutura permite uma visualização clara e objetiva da distribuição dos pinos do microcontrolador no sistema.

5.5.2. Programação do ESP32

A programação do microcontrolador ESP32 foi realizada integralmente na plataforma Arduino IDE, o mesmo ambiente utilizado para o desenvolvimento de aplicações com o microcontrolador Arduino. A linguagem empregada foi o C++ com adaptações específicas fornecidas pela própria IDE. Um dos principais desafios enfrentados durante o desenvolvimento do software da chocadeira foi a criação de uma interface de usuário que fosse simples, clara e intuitiva, permitindo que qualquer pessoa pudesse configurar facilmente as variáveis ambientais do protótipo, como temperatura, umidade e tempo de incubação.

Além da interface, houve uma atenção especial à programação individual de cada módulo funcional do sistema. Para o módulo de controle de temperatura, que utiliza a lógica PID, foi necessário empregar uma biblioteca especializada nesse tipo de controle. Já no módulo de movimentação da plataforma, a programação do servo motor MG996R foi realizada com o auxílio de sua biblioteca específica, o que possibilitou sua correta calibração e controle. No caso do módulo de umidade, não foi necessária a instalação de bibliotecas adicionais, pois o controle foi implementado por meio da simples ativação dos relés conectados a um módulo de quatro saídas.

Após o início do processo de incubação, foi programada uma tela de monitoramento em tempo real, permitindo ao usuário acompanhar continuamente as leituras dos sensores, o comportamento do controle PID e os valores das variáveis ambientais. Além disso, foi implementado um temporizador regressivo, exibido na interface, que informa o tempo restante para a conclusão do ciclo de incubação, contribuindo para uma operação mais eficiente e segura do protótipo.

5.5.3. Sintonia do Controle PID

O método escolhido para a sintonia dos parâmetros proporcional, integral e derivativo do controle PID foi o método manual de tentativa e erro. Nesse procedimento, o programador realiza ajustes sucessivos nos parâmetros com base nas respostas obtidas do sistema. A escolha desse método se deu pela sua simplicidade e pela ausência de necessidade de definição prévia de parâmetros, o que reduz o tempo entre a montagem do módulo de aquecimento e o início da sua sintonia.

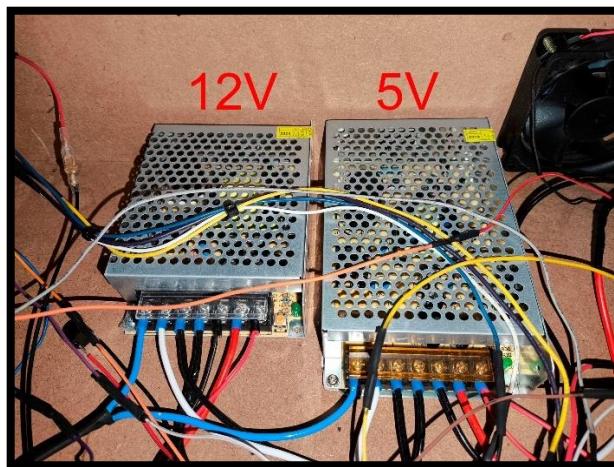
Apesar de permitir uma rápida implementação inicial, o método de tentativa e erro não é o mais eficiente nem o mais preciso. A sua aplicação exige um conhecimento técnico aprofundado sobre o comportamento do sistema a ser controlado. Cada resposta gerada pelo PID (seja proporcional, integral ou derivativa) exige a alteração cuidadosa de um parâmetro específico, o que torna o processo de sintonia mais demorado quando comparado a métodos mais sistemáticos e automatizados.

5.6. FONTES DE ALIMENTAÇÃO

As fontes de alimentação são elementos essenciais para o funcionamento de qualquer componente eletrônico, uma vez que fornecem a energia necessária para sua operação. Elas possuem polos positivo e negativo, e sua escolha deve considerar tanto as características do sistema elétrico quanto os requisitos específicos dos dispositivos que serão alimentados, incluindo tensão, corrente e finalidade de uso.

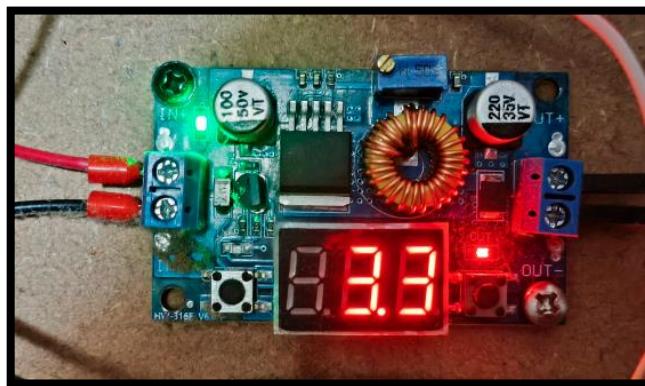
No protótipo desenvolvido para a chocadeira foram utilizadas fontes de alimentação de 12 V e 5 V, além de um regulador de tensão do tipo *step-down*. Esse regulador é responsável por reduzir a tensão de entrada em corrente contínua para um valor inferior, especificamente 3,3 V, necessário para alimentar determinados componentes mais sensíveis do sistema. As fontes utilizadas, bem como o regulador de tensão, estão ilustradas nas Figuras 45 e 46.

Figura 45- Fontes de Alimentação



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Figura 46- Regulador de Tensão Step-Down



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A utilização das diferentes fontes empregadas no projeto alimenta diferentes tipos de componentes, pois cada um deles possui uma tensão de funcionamento específica. Na Tabela 6 apresentaram-se as tensões de trabalho de cada componente utilizado no projeto, bem como a respectiva fonte que os alimentou.

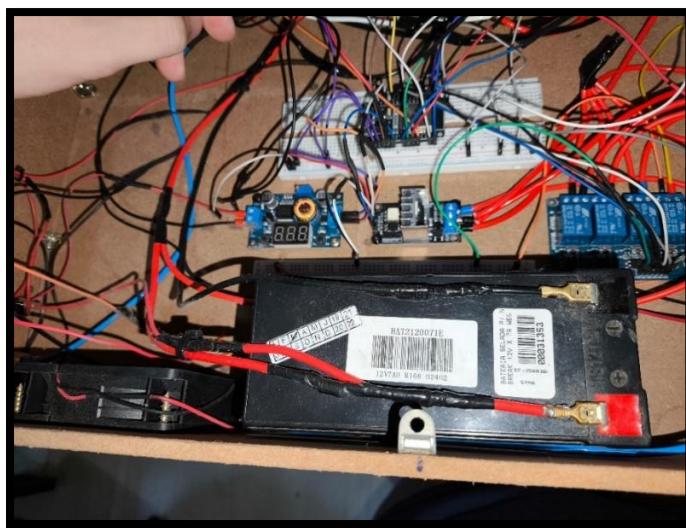
Tabela 6- Componentes e suas respectivas voltagens

Componente	Tensão e Fonte
Tela LCD 20x4 I2C	3.3V
Fans	12V
Microcontrolador ESP32	3.3V
Módulo de Relés	3.3V
Módulo AC Dimmer	3.3V
Sensor DHT22	3.3V
Servo Motor 996R	5V
Bomba D'Água	12V
Evaporadores Ultrassônicos	5V

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Todas as conexões elétricas entre as fontes de alimentação, os reguladores de tensão e os demais componentes eletrônicos do protótipo foram devidamente apresentadas. Na sequência, a Figura 47 ilustra o sistema de alimentação por bateria, responsável por manter o microcontrolador em funcionamento mesmo em caso de falha na rede elétrica. Dessa forma, garante-se a integridade dos dados durante o processo de incubação, evitando sua interrupção antes da conclusão.

Figura 47- Bateria da Chocadeira



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O funcionamento do sistema de alimentação por bateria ocorre da seguinte maneira: após a ativação das fontes de alimentação, estas passam a carregar a bateria, mantendo-a com uma tensão de 12 volts. Quando acionada, a bateria fornece essa tensão de 12 volts ao regulador do tipo *Step-Down*, que realiza a conversão para 3,3 volts, valor necessário para alimentar o microcontrolador e os demais componentes que operam nessa mesma faixa de tensão.

5.7. INTERFACE DE USUÁRIO

A interface de usuário foi concebida desde o início com foco na simplicidade e objetividade, visando proporcionar uma navegação intuitiva que permita a qualquer usuário acessar suas funções e programar a incubadora de acordo com as

necessidades específicas da espécie a ser incubada. As funcionalidades dos botões e suas respectivas funcionalidades estão descritas no Quadro 7.

Botões	Funcionalidades
Menu	Voltar / Abrir Menu
<	Navegar para a Esquerda / Decrementar
OK	Confirmar / Selecionar
>	Navegar para a Direita / Incrementar

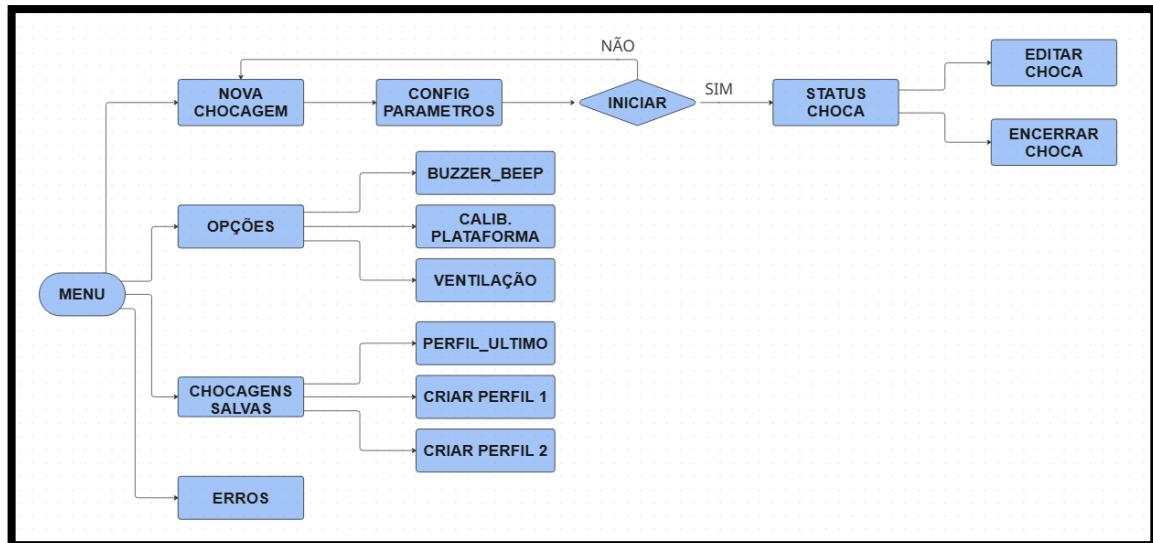
Quadro 7- Funções dos Botões

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Cada tela da interface de usuário disponibiliza interações específicas por meio dos botões descritos no Quadro 7. As funcionalidades variam conforme o tipo de tela acessada, que pode incluir telas de monitoramento, configuração, edição de parâmetros, criação de perfis de memória, opções, entre outras.

O desenvolvimento do *software* da interface foi estruturado em blocos funcionais, sendo que cada bloco pode conter uma ou mais telas, acessadas por meio dos botões da interface. Na Figura 48, apresenta-se um resumo dos principais blocos que compõem o software do protótipo.

Figura 48- Diagrama de Blocos simplificado da Interface da Chocadeira



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O diagrama de blocos simplificado do projeto apresenta o fluxo básico das principais funcionalidades implementadas no *software*. Dentre essas, destacam-se: o

processo de inicialização da incubação, as opções de personalização e utilitários, as configurações de perfis de memória e a exibição de mensagens de erro.

5.7.1. Pré-Configuração para Choca de Ovos de Galinha

Com base em uma extensa pesquisa e revisão da literatura, foram definidos os parâmetros utilizados durante o processo de incubação de ovos de galinha, os quais estão apresentados no Quadro 8.

Parâmetro	Tempo 1	Tempo 2
Temperatura (°C)	37.7	37.4
Umidade (%)	54.5	59.5
Tempo (Dias)	18	3
Intervalo de Viragem (Horas)	2	-

Quadro 8- Parâmetros utilizados para a incubação de ovos de galinha

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Conforme apresentado no Quadro 8, o primeiro período de incubação teve duração de 18 dias, com intervalo de viragem a cada 2 horas, sob condições ambientais de 37,7°C de temperatura e 54,5% de umidade relativa. O segundo período, correspondente à fase final da incubação, teve duração de 3 dias, com a viragem dos ovos desativada e parâmetros ajustados para uma temperatura de 37,4°C e umidade relativa de 59,5%.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Interface de Usuário foi desenvolvida com o objetivo de criar um *software* simples e intuitivo, permitindo que qualquer usuário consiga inserir os parâmetros ambientais necessários e conduzir o processo de incubação de forma prática e eficiente. Sua estrutura foi baseada no diagrama de blocos apresentado na Figura 48. As imagens a seguir ilustram o resultado final da interface, exibindo cada tela individualmente, acompanhada da explicação de suas respectivas funcionalidades (Figura 49).

Figura 49- Tela de Menu Principal



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O menu representa a interface inicial do sistema e concentra as principais funcionalidades da incubadora. Por meio dos botões disponíveis, o usuário pode interagir de diversas maneiras, conforme a tela exibida. É possível navegar entre as opções, selecioná-las, avançar ou retroceder entre as telas, ajustar parâmetros e até reiniciar o microcontrolador. A Figura 50 apresenta, de forma sequencial, as telas que compõem a funcionalidade central do sistema, intitulada “Nova Chocagem”.

Figura 50- Tela de Nova Chocagem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Na Figura 50, é apresentada a tela em que o usuário pode configurar a duração dos períodos de incubação (Tempo 1 e Tempo 2), bem como os respectivos parâmetros ambientais associados a cada fase. Também é possível definir o intervalo de viragem da plataforma. Já a Figura 51 exibe a tela de monitoramento, na qual são apresentados os dados provenientes dos sensores, juntamente com as configurações ambientais em vigor após o início do processo de incubação.

Figura 51- Tela de Monitoramento



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Na tela de monitoramento, são apresentadas informações relevantes como T1 (Tempo 1) e T2 (Tempo 2), que indicam, respectivamente, o tempo restante para a conclusão de cada período previamente configurado. Também são exibidos os parâmetros ambientais, como T.A (Temperatura Atual) e T.F (Temperatura Final), correspondentes à temperatura medida em tempo real e à temperatura ideal previamente definida. De forma análoga, os dados de umidade são representados por U.A (Umidade Atual) e U.F (Umidade Final), indicando os valores medidos e desejados, respectivamente.

A segunda tela de monitoramento exibe o intervalo de viragem da plataforma, conforme configurado pelo usuário, além da duração estabelecida para os períodos T1 e T2. A terceira tela está relacionada às opções da incubação em andamento. Nessa interface, a opção "Status Choca" retorna à tela de monitoramento, "Editar Choca" permite a modificação dos parâmetros da incubação em curso e "Encerrar Choca" possibilita a finalização antecipada do processo antes do término do período

T2. Ao retornar ao menu principal, conforme ilustrado na Figura 52, o usuário tem acesso a todas as opções disponíveis no sistema.

Figura 52- Tela de Opções



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A Tela 1 apresenta a interface com todas as opções de configuração do sistema. Na Tela 2, o usuário pode ativar ou desativar o sinal sonoro (*buzzer*). A Tela 3 permite a calibração do ângulo de viragem da plataforma, garantindo maior precisão no controle do movimento. Já na Tela 4, é possível controlar manualmente o sistema de ventilação da incubadora, ligando ou desligando a circulação de ar conforme a necessidade.

Além dessas funcionalidades, o sistema oferece a possibilidade de armazenamento de até dois perfis de memória, conforme ilustrado na Figura 53. Cada perfil pode ser configurado com diferentes parâmetros de tempo e condições

ambientais, permitindo a adaptação da incubadora a diferentes espécies com exigências específicas. Essa funcionalidade proporciona maior flexibilidade e praticidade ao usuário durante o processo de incubação.

Figura 53- Tela de Perfilis



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A Tela 1 exibe a interface de perfis de memória quando ainda não há nenhum perfil salvo. Já a Tela 2 apresenta o Perfil 1 previamente criado. Na Tela 3, são mostradas as opções disponíveis para cada perfil, permitindo ao usuário iniciar a incubação a partir do perfil selecionado, editá-lo ou excluí-lo, conforme ilustrado na Figura 53.

Destaca-se, ainda a tela de erros, representada na Figura 54. Essa interface tem a função de alertar o usuário sobre falhas críticas no sistema, possibilitando a identificação imediata de eventuais problemas no protótipo e contribuindo para a correção rápida e segura dessas ocorrências.

Figura 54- Tela de erros



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Ao analisar a Figura 54, verifica-se que não há registro de falhas críticas no momento, sendo exibida apenas a mensagem “vazio”. Em situações em que ocorra alguma anomalia, o sistema exibirá uma mensagem de erro acompanhada da identificação do componente responsável pela falha, o que facilita o diagnóstico e a correção do problema.

Com a finalização da interface de usuário, foi realizada a sintonia dos parâmetros do controlador PID. Essa calibração foi conduzida por meio do método de tentativa e erro. De acordo com Roth (2023), o método de tentativa e erro consiste em ajustar os parâmetros do PID e observar continuamente o comportamento do processo até atingir o desempenho desejado com o objetivo de otimizar a resposta dinâmica do sistema de controle térmico. A Figura 55 apresenta os valores obtidos durante o processo de ajuste dos parâmetros do PID.

Figura 55- Configuração final dos parâmetros PID da Chocadeira

```

84 // Parâmetros de ajuste do PID
85 double Kp = 260.0; // Ganho proporcional
86 double Ki = 0.41; // Ganho integral
87 double Kd = 19.0; // Ganho derivativo

```

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

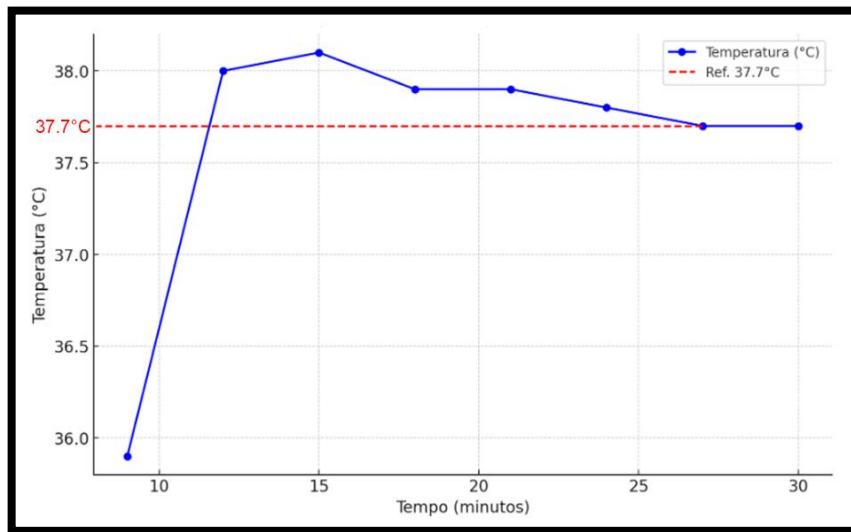
Com base nos parâmetros obtidos na Figura 55, foi conduzido um teste experimental com duração de 30 minutos. Durante esse período, foram coletadas 11 amostras referentes às seguintes variáveis: temperatura, erro em relação ao valor de referência, tempo e umidade, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Teste de Aquecimento com duração de 30 minutos

Tempo (Min)	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Erro em Relação ao Valor Desejado (37.7°C)
0	25.6	74.8	11.8
3	29.4	78.9	8.3
6	33.3	78.7	4.4
9	35.9	76.9	1.8
12	38	74.6	-0.3
15	38.1	70.9	-0.4
18	37.9	69.2	-0.2
21	37.9	67	-0.2
24	37.8	66.9	-0.1
27	37.7	65.6	0
30	37.7	65.1	0

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A partir dos dados obtidos da Tabela 7 foi elaborado um gráfico, representando a variação da temperatura ao longo do tempo, com o objetivo de verificar a eficiência da sintonia do controlador PID. Esse gráfico pode ser visualizado na Figura 56.

Figura 56- Gráfico do Controle PID de Temperatura

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Conforme ilustrado na Figura 56, a aplicação do controle PID na variável temperatura mostrou-se eficiente, atingindo a estabilização no valor de referência em cerca de 27 minutos. O sistema apresentou um sobressinal máximo de apenas 0,4°C, equivalente a aproximadamente 1% da temperatura alvo de 37,7°C. Esse resultado é considerado altamente satisfatório para os parâmetros do projeto, pois evidencia uma resposta rápida e estável, sem prejudicar o desempenho térmico do protótipo.

Com a conclusão da fase de testes, deu-se início ao processo de incubação dos ovos de galinha, obedecendo aos parâmetros estabelecidos no Quadro 8. Nessa fase, o módulo de controle de umidade, operando por meio de relés, manteve a umidade relativa de forma constante, variando entre 54% e 56%, como demonstrado na Figura 57. Segundo Lundy (1969), o intervalo ideal de umidade relativa em incubadoras está entre 40% e 70%, o que comprova a conformidade dos níveis alcançados pelo sistema.

Figura 57- Umidade máxima obtida com os evaporadores ultrassônicos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O processo de incubação foi iniciado com 24 ovos de galinha caipira e devido à dificuldade de obtenção, os ovos utilizados não passaram por nenhum tipo de controle de qualidade, tampouco havia confirmação sobre sua frescura, ou seja, não foi possível determinar se eram ovos frescos ou antigos. De acordo com Kok (2011), para garantir o sucesso na incubação, devem-se escolher ovos frescos, com até uma semana de produção de boas poedeiras e evitar aqueles com conformações irregulares, gemas duplas ou defeitos na casca.

Após 14 dias de incubação, foi realizada a ovoscopia com o objetivo de avaliar o estágio de desenvolvimento embrionário de cada ovo. Com base nos resultados dessa análise, os ovos foram devidamente identificados e marcados, conforme ilustrado na Figura 58.

Figura 58- Resultado da Ovoscopia



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A partir dos resultados obtidos por meio da ovoscopia, os ovos foram reorganizados na plataforma e identificados com as seguintes marcações: “V” para embriões vivos, “M” para embriões mortos e “NT” para ovos não galados ou inférteis. Ao final do período de incubação, transcorridos os 21 dias, a chocadeira foi desligada e os ovos foram retirados para a elaboração dos dados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8- Estatísticas da Incubação

Estatísticas	Respectivos Valores
Vivo	15
Morto	1
Não Galado	8
Taxa de Aproveitamento	66,7%
Taxa de Eclosão	60%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Conforme os dados apresentados na Tabela 8, a taxa de aproveitamento dos ovos foi de 66,7%, indicando que 16 dos 24 ovos utilizados no início da incubação estavam férteis. A autora De Sa *et al.* (2020) fez um trabalho similar, porém obteve ovos de 4 fornecedores diferentes variando a taxa de aproveitamento de 20% até 88% dependendo do fornecedor.

Dentre os ovos férteis utilizados, foi registrada uma taxa de eclosão de 60%. Ao comparar esse resultado com os dados apresentados por De Sa *et al.* (2020), observa-se que os autores obtiveram uma taxa de eclosão de 94,59%, considerando exclusivamente os ovos embrionados. De acordo com Cobb (2020), fatores como

doenças, armazenamento inadequado, características genéticas, deformações na casca e a idade dos ovos podem influenciar negativamente o desenvolvimento embrionário, resultando em perdas durante a incubação.

No que se refere à qualidade do processo, observou-se que nenhum pintainho ficou aderido à casca, o que evidencia a eficiência do sistema de umidade e a pontualidade na viragem dos ovos. Esse resultado reforça a importância da rotação adequada durante a incubação, fator esse destacado por Cobb (2020), que aponta essa prática como essencial para evitar que o embrião se fixe nas membranas internas da casca, o que comprometeria sua viabilidade.

Além disso, todos os nascimentos ocorreram de forma sequencial, entre o 20º e o 21º dia do processo, demonstrando que a temperatura interna da incubadora foi mantida dentro dos padrões ideais. Segundo Viola *et al.* (2019), temperaturas acima do recomendado podem acelerar o desenvolvimento do embrião, provocando eclosões prematuras ou até mesmo a morte embrionária, enquanto temperaturas abaixo do ideal tendem a retardar ou interromper o desenvolvimento, podendo levar à eclosão tardia ou à falha completa do processo.

Esses resultados indicam que o protótipo foi eficaz em manter a temperatura, umidade e intervalo de viragem dentro dos parâmetros pré definidos ao longo de todo o período de incubação. Após a eclosão, os pintinhos foram transferidos para o berçário, conforme ilustrado na Figura 59.

Figura 59- Pintinhos no berçário após o nascimento



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O berçário foi montado utilizando uma caixa de papelão, na qual uma lâmpada de 40W foi empregada para manter os pintinhos aquecidos a uma temperatura ambiente de aproximadamente 35 °C. Durante o processo de incubação, no entanto, ocorreram alguns imprevistos que possivelmente impactaram negativamente a taxa de eclosão obtida pelo protótipo.

O primeiro contratempo esteve relacionado à seleção dos ovos. Conforme indicado na Tabela 8, cerca de 33% dos ovos utilizados não estavam galados, ou seja, não apresentaram desenvolvimento embrionário. Além disso, houve interrupções no fornecimento de energia elétrica e falhas causadas pela queima de lâmpadas, o que resultou em mais de 7 horas com temperaturas inferiores a 30 °C (condição crítica para o desenvolvimento embrionário adequado).

Caso não tivessem ocorrido os problemas relacionados à temperatura, e se fosse possível obter ovos de galinha com menos de uma semana de postura, em quantidade suficiente para a realização de todas as etapas de controle de qualidade, os resultados obtidos poderiam ter sido ainda mais satisfatórios.

7. CONCLUSÃO

As variações e a imprecisão nos parâmetros de temperatura e umidade durante a incubação podem comprometer a qualidade e a taxa de eclosão dos pintainhos. Neste sentido, o uso de tecnologias como sistemas de automação para controle ambiental fez-se necessário para resolver esses problemas. Neste trabalho foi desenvolvida uma chocadeira automatizada capaz de realizar ajustes automáticos em tempo real dos parâmetros de incubação, tendo como objetivo manter condições ambientais ideais e, assim, aumentar a eficiência e a flexibilidade do processo de incubação dos ovos.

Durante o processo de incubação, no qual foram utilizados ovos de galinha, além de manter condições ambientais adequadas, foi fundamental garantir a viragem periódica dos ovos, pois a ausência desse movimento poderia provocar a aderência do embrião à casca, comprometendo seu desenvolvimento e até levando à morte embrionária. Para impedir que o embrião grudasse na casca, foi apresentado neste trabalho um sistema de bandeja, cujo ângulo de inclinação é ajustado periodicamente por um controle digital integrado à chocadeira. Quando aplicado ao processo de incubação, tal sistema contribui para a melhoria da qualidade da choca e para o aumento da taxa de eclosão dos ovos.

Em chocadeiras caseiras, a inserção ou alteração dos valores de temperatura e umidade é um grande problema, pois muitas das vezes a chocadeira é construída em malha aberta, não permitindo alteração após o início do processo. A fim de resolver esse problema, foi integrado ao protótipo uma interface interativa, na qual o usuário pode alterar os parâmetros de ambiente em qualquer fase do processo e, deste modo, monitorar o controle em tempo real.

Para garantir maior precisão no controle, foi necessário o uso de uma biblioteca de controle PID para o módulo de temperatura, enquanto o módulo de umidade operou com um sistema de controle do tipo *On/Off*. Após a construção do protótipo, os módulos foram instalados com a finalidade de viabilizar a análise do seu desempenho e dos resultados obtidos durante o processo de incubação.

Na utilização dos ovos de galinha caipira, foram respeitados seus respectivos parâmetros de umidade, temperatura e tempo de viragem. Para que isso fosse

possível, foi utilizada a interface interativa para inserção e monitoramento dos parâmetros durante o processo de choca.

Durante a incubação, os parâmetros de ambiente permaneceram dentro dos valores pré-configurados e a plataforma de ovos inclinou periodicamente, respeitando o intervalo e o ângulo pré-determinados. Neste contexto, os pintainhos que eclodiram nasceram todos em um intervalo de 10 horas entre os dias 20 e 21, mostrando que a temperatura se manteve adequada durante o período testado, e nenhum deles nasceram aderidos à casca. Tal processo indicou, novamente, que não foram identificadas variações de umidade fora do valor determinado.

Contudo, durante a escolha dos ovos, foi de extrema dificuldade a obtenção de ovos galados para a realização do experimento. Dos 24 ovos obtidos para o teste, aproveitaram-se apenas 16, cerca de 67%. Desses 16 ovos, 1 morreu durante a incubação, 4 não conseguiram quebrar a casca e 9 pintainhos eclodiram. Nesta perspectiva, a taxa de eclosão obtida foi de 60%.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se uma criteriosa seleção dos ovos, priorizando aqueles que sejam frescos, apresentem padrões visuais adequados e que tenham passado por uma avaliação de qualidade, descartando os que apresentem indícios de envelhecimento. Tal procedimento poderá contribuir para o aumento das taxas de concepção, reforçando ainda mais os dados satisfatórios obtidos com a aplicação da pesquisa.

Além disso, é aconselhável a implementação de nobreaks ou sistemas com baterias, a fim de garantir o funcionamento contínuo da incubadora em casos de instabilidade ou falhas no fornecimento de energia elétrica. Também é indicado manter lâmpadas halógenas de reserva, possibilitando a substituição imediata em caso de falha, o que contribui para evitar quedas de temperatura que possam comprometer o desenvolvimento embrionário dos ovos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Poliane Martins. **Incubação Artificial**. 2008. 59 f. TCC (Graduação) – Curso de Veterinária, Campus Jatobá, Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2008. Disponível

em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/178/o/Poliane%20Martins%20Almeida.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2024.

AMARAL, Gisele et al. **Avicultura de Postura: estrutura da cadeia produtiva**. Avicultura de Postura: panorama do setor no Brasil e no mundo, Rio de Janeiro, n. 43, p. 167–207, mar. 2016. Apoio do BNDES. Disponível em: https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9579/3/BS%2043%20Avicultura%20de%20postura_estrutura%20da%20cadeia%20produtiva_corrigido_P_BD.pdf. Acesso em: 11 jul. 2024.

AMAZON.COM.BR. **Regulador de Tensão Ajustável LM2596 com Display**. [S.I.]: Amazon, 2025. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Regulador-Tens%C3%A3o-Ajust%C3%A1vel-Lm2596-Display/dp/B0CQ9Z9M2M>. Acesso em: 20 maio 2025.

ASHCROFT WILLY BRASIL. **Sistemas de controle de ambientes: o controle LIGA/DESLIGA (ON/OFF)**. Disponível em: <https://ashcroft.com.br/sistemas-de-controle-de-ambientes-o-controle-liga-desliga-on/off/>. Acesso em: 27 abr. 2025.

ASTROM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers**. Princeton: Princeton University Press, 2008.

ASTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2. ed. Research Triangle Park: ISA (Instrumentation, Systems and Automation Society), 1995.

ÅSTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. 2. ed. Research Triangle Park, NC: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995.

BENNETT, Stuart. *Development of the PID Controller*. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 13, n. 6, p. 58–62, 1994. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/3206306_Development_of_the_PID_Controller. Acesso em: 26 de abril de 2025.

BOJORGE, N. **Sintonia de malhas de controle**. Disciplina: TEQ102- CONTROLE DE PROCESSOS. Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, 2017. Disponível em: https://www.professores.uff.br/ninoska/wpcontent/uploads/sites/57/2017/10/Control_Aula16_Sintonia_2sem17-1.pdf. Acesso em: 06 maio 2024.

BOLELI, I. C.; MORITA, V. S.; MATSUURA, E. **Poultry Egg Incubation: Integrating and Optimizing Production Efficiency**. Revista Brasileira de Ciência Avícola, v. 18, n. 4, p. 1–18, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbca/a/ZFYLhJkZ8VSvpXZSJmCcKvr/?lang=en>. Acesso em: 22 abr. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 30.691**, de 29 de março de 1952. Aprova o regulamento da inspeção industrial e sanitária de produtos de origem animal. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 abr. 1952.

BRUZUAL, J. J.; PEAK, S. D.; BRAKE, J.; PEEBLES, E. D. **Effects of Relative Humidity During Incubation on Hatchability and Body Weight of Broiler Chicks from Young Breeder Flocks**. *Poultry Science*, [S.I.], v. 79, p. 827-830, 2000.

CALIL, T. A. C. **Princípios básicos de Incubação**. In: Canais da Conferência Apinco. Simpósio sobre Incubação, 2007, Campinas. Anais... Campinas: Ed. FACTA, 2007, p. 19–45.

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

CARDOSO, Matheus. **Conceitos Básicos de Controle: Malha Aberta X Malha Fechada**. 2020. Disponível em: <https://edu.ieee.org/br-ufcgras/conceitos-basicos-decontrole-malha-aberta-x-malha-fechada/>. Acesso em: 06 maio 2024.

COBB-VANTRES. **Guia de Manejo de Incubação**. Guapiaçu, SP. Cobb-Vantress Brasil 2020.

COHEN, G. H.; COON, G. A. **Synthesis of self-tuning controllers for first-order processes with dead time**. [S.l.:s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/63/5/3>. Acesso em: 3 maio 2025.

CURTO CIRCUITO. **Placa DOIT ESP32-WROOM-32D - USB C**. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/placa-doit-esp32-wroom-32d-usb-c.html>. Acesso em: 07 maio 2025.

DA SILVA, Flávio Thimotio. **Simulated Annealing Aplicado ao Problema de Sintonia de Parâmetros de Controladores PID: Média do Erro Quadrático (MSE)**. Monografia (Bacharel em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335134781_SIMULATED_ANNEALING_APPLICADO_AO_PROBLEMA_DE_SINTONIA_DE_PARAMETROS_DE_CONTROLDADORES_PID. Acesso em: 24 abr. 2025.

DE SA, C. O. et al. **Manejo de ovos em chocadeiras comunitárias como ferramenta de análise dos sistemas de produção de galinhas de capoeira e processo de incubação**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1129408/1/CIRC-89-20-Manejo-de-ovoss.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

DECUYPERE, K.; MICHEELS, H. **Incubation temperature as a management tool: a review.** *World's Poultry Science Journal*, [S.I.], v. 48, p. 27-38, 1992.

DEEMING, D. C. ***Avian incubation: behaviour, environment and evolution.*** Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

EIL, J.-P. ***Weighing the Benefits of Automation in the Hatchery.*** The Poultry Site, 13 ago. 2011. Disponível em: <https://www.thepoultrysite.com/articles/weighing-the-benefits-of-automation-in-the-hatchery>. Acesso em: 22 abr. 2025.

El-Ashram, M. M. (2020). ***Egg Turning During Incubation – a review.*** EmTech Hatchery Systems Ltd. Disponível em: <https://www.emtech-systems.com/technical-talk/egg-turning-during-incubation-a-review-by-mohamed-mostafa-el-ashram/>

EMERSON – Emerson Automation Solutions. ***PID Control History and Advancements.*** 2013. Disponível em: <https://www.emersonautomationexperts.com/2013/control-safety-systems/pid-control-history-and-advancements/>. Acesso em: 26 de abril 2025.

FERMINO, Fernando et al. **Estudo comparativo de métodos de sintonia de controladores PID.** 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

FERREIRA, Gabriele. **Animais ovíparos.** Grupo Escolar, [s.d.]. Disponível em: <https://www.grupoescolar.com/pesquisa/animais-oviparos.html>. Acesso em: 29 abr. 2025.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, Michael L.; EMAMI-NAEINI, Abbas. ***Feedback Control of Dynamic Systems.*** 8. ed. London: Pearson Education, 2019. Disponível em: <https://scsolutions.com/publication/feedback-control-of-dynamic-systems-eighth-edition/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

FRENCH, N. A. *Modeling Incubation Temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size*. Poultry Science, United Kingdom, v. 76, p. 124–133, 1997.

GARCIA, Claudio. **Controle de processos industriais: Volume 1** – São Paulo: Blucher, 2017.

GARCIA, Cláudio. **Controle de processos industriais: volume 1 – estratégias convencionais**. São Paulo: Ed. Blucher, 2017. ISBN 978-85-212-1185-3.

IBM Brasil. **O que é um microcontrolador? Think**. IBM Brasil, 4 jun. 2024. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/microcontroller#:~:text=e%20lan%20Smalley,O%20que%20%C3%A9%20um%20microcontrolador?,de%20um%20sistema%20operacional%20complexo>. Acesso em: 21 mai. 2025.

IFC – INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE. **Instrumentação: Parte 1 – Conceitos Básicos**. 2016. Disponível em: <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/giovani-pasetti/wp-content/uploads/sites/35/2016/03/Instrumenta%C3%A7%C3%A3o-Parte-1-Conceitos-B%C3%A1sicos.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2025.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - ROBOTICS AND AUTOMATION SOCIETY - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE. **Como funciona o controlador ON/OFF?** 2020. Disponível em: <https://edu.ieee.org/br-ufcgras/como-funciona-o-controlador-on-off/>. Acesso em: 27 abr. 2025.

INSTITUTO METRÓPOLE DIGITAL. **Aula 03 – Controle PID – Controlador Proporcional (P)**. Versão 5.3. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Instituto Metrópole Digital, [s.d.]. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/63/3/5>. Acesso em: 02 maio 2025.

INSTITUTO METRÓPOLE DIGITAL. Aula 06 – **Sintonia de controladores PID: Método da integral do erro e método do relé.** Natal: IMD/UFRN, 2023. Material Público IMD/UFRN. Versão 5.3. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/63/6/5>. Acesso em: 12 maio 2025.

INSTITUTO METRÓPOLE DIGITAL. In: Cursos / Automação Industrial / Instrumentação e Sensores: Aula 01 - **Introdução Sensores analógicos.** Natal: IMD/UFRN, [s.d.]. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/52/1/7>. Acesso em: 19 maio 2025.

JOY-IT. **NodeMCU ESP32.** Joy IT, 2025. Disponível em: <https://joy-it.net/en/products/SBC-NodeMCU-ESP32>. Acesso em: 21 maio 2025.

JUÁREZ-ESTRADA, M. A.; LÓPEZ-RUIZ, E. I.; LÓPEZ-CORDOVA, S.; TELLEZ-ISAIAS, G.; PRADO-REBOLledo, O. F. *Increased CO₂ levels during the first half of incubation at high altitude modifies embryonic development of fertile Leghorn breeder eggs.* Food and Nutrition Sciences, v. 15, n. 7, p. 524–547, jul. 2024. DOI: 10.4236/fns.2024.157035.

KOK, Eva et al. **Melhoria da incubação de ovos e criação de pintos.** 2. ed. Wageningen: Digrafi, 2011. 88 p. Disponível em: <https://cgospace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/87eed949-e33e-434c-87f1-5901b797ffa1/content>. Acesso em: 09 jul. 2024.

LOURENÇO, João. **Sintonia de Controladores P.I.D. [S. I.]**, 1996. Revisado em 1997. Disponível em: <http://alvarestech.com/temp/smar/2019/PID-LugarDasRaizes-Matlab-Tutorial.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

LOURENÇO, João. **Sintonia de controladores PID.** Escola superior de tecnologia, 1997.

LUNDY, H. *A review of the effects of temperature, humidity, turning and gaseous environment in the incubator on hatchability of hen's eggs*. Ed. Oliver and Boyd, Edinburgh, Scotland, UK, p. 143–176, 1969.

MAKERHERO. **Guia de Componentes Eletrônicos: Relé**. MakerHero, [s.d.]. Disponível em: <https://www.makerhero.com/guia/componentes-eletronicos/rele/>. Acesso em: 20 maio 2025.

MAKERHERO. **O que é fonte de alimentação? Funcionamento, tipos e exemplos**. MakerHero, [s.d.]. Disponível em: <https://www.makerhero.com/guia/componentes-eletronicos/fonte-de-alimentacao/>. Acesso em: 20 maio 2025.

MAKERHERO. **O que é Raspberry Pi? Guia completo e gratuito!** MakerHero. Disponível em: <https://www.makerhero.com/guia/raspberry-pi/o-que-e-raspberry-pi/>. Acesso em: 21 maio 2025.

MAKERHERO. **Sensor de umidade e temperatura AM2302 DHT22**. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/sensor-de-umidade-e-temperatura-am2302-dht22/>. Acesso em: 19 maio 2025.

MARQUES, Lucas. **Tipos de atuadores e suas principais diferenças**. Samson Brasil, 7 nov. 2024. Disponível em: <https://www.samsonbrasil.com.br/tipos-de-atuadores/>. Acesso em: 19 maio 2025.

MATTEDE, Henrique. **O que são sensores e quais as suas aplicações?** Mundo da Elétrica. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-sensores-e-quais-as-suas-aplicacoes/>. Acesso em: 19 maio 2025

MELLO, Marcio. **Placa ESP32: Descubra o que é, para que serve e muito mais!** Victor Vision. 2024. Disponível em: <https://victorvision.com.br/blog/placa-esp32/>. Acesso em: 21 maio 2025.

METTZER BLOG. **Pesquisa experimental: o que é e como fazer em 5 passos.** Mettzer, 2018. Disponível em: <https://blog.mettzer.com/pesquisa-experimental/>. Acesso em: 10 maio 2025.

NATANAEL, M. **O que é um microcontrolador?** Robopatos. 2022. Disponível em: <https://www.robopatos.cafe/post/o-que-%C3%A9-um-microcontrolador>. Acesso em: 20 maio 2025.

NORTH et al. **Commercial chicken production manual.** 4. ed. Ontario: Avi Pub. Co, 1990. 913 p. Library of Congress.

OGATA, Katsuhiko. **Modern Control Engineering.** 5. ed. Prentice Hall, 2010.

OGATA, Katsuhiko. **Modern Control Engineering.** 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2010. Disponível em: https://docs.znu.ac.ir/members/pirmohamadi_ali/Control/Katsuhiko%20Ogata%20_Modern%20Control%20Engineering%205th%20Edition.pdf. Acesso em: 30 abr. 2025.

Petersime. (2023). **Why humidity is important for hatching eggs.** Petersime. Disponível em: <https://www.petersime.com/expertise/why-humidity-is-important-for-hatching-eggs>

PITANGA, Ângelo Francklin. **Pesquisa qualitativa ou pesquisa quantitativa: refletindo sobre as decisões na seleção de determinada abordagem.** Revista Pesquisa Qualitativa, São Paulo, v. 8, n. 17, p. 184-201. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33361/rpq.2020.v.8.n.17.299>. Acesso em: 19 março 2025.

PORTAL DISTRIBUIDORA. **Componentes eletrônicos: o que são e para que servem?** Disponível em: <https://portaldistribuidora.com.br/componentes-eletronicos/>. Acesso em: 19 maio 2025.

PRÓSPERO, Israel. **Microcontroladores: o que são e aplicações**. EESC jr. Blog, São Carlos, SP. 2020. Disponível em: <https://eescjr.com.br/blog/microcontroladores-o-que-sao-e-aplicacoes/#:~:text=Seja%20em%20uma%20resid%C3%A3ncia%2C%20seja,suas%20aplica%C3%A7%C3%A7%B5es%20s%C3%A3o%20muito%20limitadas>. Acesso em: 21 mai. 2025.

PST PROCESS SENSING TECHNOLOGIES. **Sensores analógicos vs. digitais - desvendando os fatores de custo**. [S.I.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.processsensing.com/pt-br/blog/digital-versus-analog-sensors.htm>. Acesso em: 19 maio 2025.

ROBERTSON, I. S. ***Studies in the effect of humidity on the hatchability of hen's eggs***. I. The determination of optimum humidity for incubation. Journal for Agricultural Science, v. 57, p. 185–194, 1961.

ROISENBERG, L. **O que é um Conversor DC/DC Step Down?** Blog LRI Automação Industrial, 11 dez. 2023. Disponível em: <https://blog.lri.com.br/o-que-e-um-conversor-dc-dc-step-down/>. Acesso em: 20 mai. 2025.

ROTH, Roberta. **Sintonia do Controle PID**. Novus Blog, 10 abr. 2023. Disponível em: <https://blog.novus.com.br/sintonia-do-controle-pid/>. Acesso em: 12 mai. 2025.

SENSOR CF. **Qual é a diferença entre sensor analógico e sensor digital?** CFSensor. 2025. Disponível em: <https://cfsensor.com/pt/difference-between-analog-sensor-and-digital-sensor/>. Acesso em: 19 mai. 2025.

SILVA, Joao Manoel Gomes da. **Ação Liga-Desliga (On-off)**. 2000. Disponível em: <https://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node20.html>. Acesso em: 27 abr. 2025.

STA ELETRÔNICA. **Características principais do Arduino Uno.** São Paulo: STA Eletrônica, [s.d.]. Disponível em: <https://www.staelectronica.com.br/artigos/arduinoss/caracteristicas-principais-do-arduino-uno>. Acesso em: 21 maio 2025.

THE POULTRY SITE. **Care and incubation of hatching eggs.** Disponível em: <https://www.thepoultrysite.com/articles/care-and-incubation-of-hatching-eggs>. Acesso em: 03 abr. 2025.

TONA, K.; ONAGBESAN, O.; DE KETELAERE, B.; BRUGGEMAN, V.; DECUYPERE, E. **Effect of relative humidity during incubation at a set eggshell temperature and brooding temperature posthatch on embryonic mortality and chick quality.** *Poultry Science*, [S.I.], v. 92, n. 8, p. 2145-2155, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119388182>. Acesso em: 29 abr. 2025.

TONA, K.; VOEMESSE, K.; N'NANLÉ, O.; OKE, O. E.; KOUAME, Y. A. E.; BILALISSI, A.; METEYAKE, H.; OSO, O. M. **Chicken Incubation Conditions: Role in Embryo Development, Physiology and Adaptation to the Post-Hatch Environment.** *Frontiers in Physiology*, v. 13, art. 895854, 2022. DOI: 10.3389/fphys.2022.895854. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2022.895854/full>. Acesso em: 23 abr. 2025.

TRON CONTROLES ELÉTRICOS. **Relés: Tipos, Aplicações e Benefícios na Automação Industrial.** Tron – Controles Elétricos. 2024. Disponível em: <https://tron-ce.com.br/reles-tipos-aplicacoes-e-beneficios-na-automacao-industrial/>. Acesso em: 19 mai. 2025.

UNIVERSAL ROBOTS. **Servo motor: o que é, como funciona e seu uso na robótica industrial.** 2022. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/blog/servo-motor-o-que-%C3%A9-como-funciona-e-seu-uso-na-rob%C3%BCtica-industrial/>. Acesso em: 20 maio 2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Elétrica. **Aula 4 – Servo Motor.** Ilha Solteira, SP. 2013. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula-4---servo-motor-13-03-2013-final.pdf>. Acesso em: 20 maio 2025.

UNIVERSITY OF MISSOURI EXTENSION. ***Small Flock Series: Incubation of Poultry.*** Disponível em: <https://extension.missouri.edu/publications/g8353>. Acesso em: 04 abr. 2025.

VIOLA, T. H.; BEZERRA, T. A.; SOBREIRA, R. S.; COSTA, B. A.; LIMA NETO, A. F. **Considerações técnicas sobre a incubação de ovos de galinhas.** Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1117323/consideracoes-tecnicas-sobre-a-incubacao-de-ovos-de-galinhas>. Acesso em: 03 maio 2025.

WESEN. **Conversor step down: desvendando a eficiência energética.** Disponível em: <https://www.wesen.com.br/conversor-step-down>. Acesso em: 20 maio 2025.

WEST CONTROLS SOLUTIONS. **Controladores PID: tudo o que você precisa saber.** (s.d.). Disponível em: <https://west-cs.com.br/controladores-pid-controlador/>. Acesso em: 26 de abril 2025.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. ***Optimum settings for automatic controllers.*** Transactions of the ASME, v. 64, n. 8, p. 759–768, 1942. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/dynamicsystems/article/115/2B/220/41744/8/Optimum-Settings-for-Automatic-Controllers>. Acesso em: 24 abr. 2025.

ZIEGLER, John G.; NICHOLS, Nathan B. ***Optimum Settings for Automatic Controllers.*** 1942. Disponível em: https://davidr.no/iav3017/papers/Ziegler_Nichols_1942.pdf. Acesso em: 26 de abril 2025.

APÊNDICES

ANEXOS