

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALYSSON MOELLER

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE SECAGEM E MONITORAMENTO
DO FILAMENTO PLA UTILIZADO PARA IMPRESSÕES 3D**

MEDIANEIRA

2025

versão 11.0 (abr.25)

ALYSSON MOELLER

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE SECAGEM E MONITORAMENTO
DO FILAMENTO PLA UTILIZADO PARA IMPRESSÕES 3D**

**Development of a drying and monitoring device for PLA filament used in 3d
printing**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Alberto Noboru Miyadaira.

MEDIANEIRA

2025



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ALYSSON MOELLER

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE SECAGEM E MONITORAMENTO
DO FILAMENTO PLA UTILIZADO PARA IMPRESSÕES 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 28/novembro/2025

Alberto Noboru Miyadaira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Filipe Marangoni
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Naufal Santelo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Alberto Noboru Miyadaira, por acreditar no potencial desta ideia desde o início e por aceitar o desafio de me orientar. Sua confiança, paciência e orientação técnica foram fundamentais para a realização e conclusão deste trabalho.

À minha mãe, Amélia Trindade da Silva, por sua dedicação incondicional, amor e por estar sempre disposta a renunciar a seus próprios benefícios para me ajudar e apoiar durante toda a minha trajetória acadêmica e pessoal.

À minha namorada, Anna Gabriela Kist, por todo o apoio, carinho, e principalmente, pela imensa compreensão e paciência demonstrados durante os longos e difíceis meses de desenvolvimento deste TCC.

À minha avó, Natalia de Paula Moeller, minha irmã Ariane e meu pai Anderson, pelo incentivo constante e por sempre me ajudarem com tudo o que eu precisava. O suporte de vocês foi essencial.

Aos meus amigos que a faculdade me proporcionou, Carlos Eduardo de Mattia de Sousa, Danilo Sord, Diego Peterman, Gustavo Bellinato Rodrigues, Juliano Paixão, Julio Eduardo Santos de Lara, Victor Brasil e Vinicius Martins Timoteo. Agradeço pela parceria, pelas incontáveis ajudas e pelo apoio fundamental nos momentos mais difíceis durante o desenvolvimento deste trabalho e ao longo de todo o curso.

Um agradecimento especial ao professor Paulo Rodrigo Stival Bittencourt pela sua inestimável colaboração e assistência técnica. Sua disposição em auxiliar ativamente na realização dos testes de filamento foi crucial para a validação dos resultados e o avanço desta pesquisa.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica pela formação, a familiares e colegas pelo apoio e incentivo nesta jornada.

Por fim, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Medianeira, pela oportunidade de estudo, pela infraestrutura disponibilizada, pelo corpo técnico-administrativo e por proporcionar um ambiente de excelência para o desenvolvimento acadêmico e científico.

RESUMO

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de um sistema microcontrolado para secagem e pesagem de filamentos de impressão 3D, visando mitigar a degradação do material pela umidade, que compromete a resistência mecânica e a integridade estrutural das peças. O sistema proposto foi implementado com o microcontrolador STM32F103C8T6 e utiliza o sensor DHT22 para monitorar temperatura e umidade, e o módulo HX711 com célula de carga para a medição de peso do filamento, permitindo o acompanhamento do material restante. A interface homem-máquina (IHM) foi desenvolvida com um *display* TFT ST7735 e um *encoder* rotativo (KY-040) para navegação e ajuste dos parâmetros de secagem de temperatura e tempo. O controle térmico é baseado no método liga-desliga com histerese para otimizar a estabilidade. A validação experimental, focada no filamento PLA, incluiu ensaios mecânicos de tração e flexão. Os resultados demonstraram que o filamento úmido sofreu uma redução significativa na rigidez e resistência mecânica. Após o processo de secagem no protótipo, as propriedades mecânicas foram restauradas de forma significativa, o que comprova a eficácia do dispositivo em reverter parcialmente os danos causados pela umidade e em recuperar a qualidade do material para a manufatura aditiva.

Palavras-chave: termoplásticos; controle de temperatura; umidade; microcontroladores.

ABSTRACT

This work aimed to develop a microcontroller-based system for the drying and weighing of 3D printing filaments, seeking to mitigate material degradation caused by moisture, which compromises the mechanical strength and structural integrity of printed parts. The proposed system was implemented with the STM32F103C8T6 microcontroller and utilizes the DHT22 sensor to monitor temperature and humidity, and the HX711 module with a load cell for filament weight measurement, allowing for the tracking of remaining material. The human-machine interface (HMI) was developed with a ST7735 TFT display and a rotary encoder (KY-040) for navigation and adjustment of drying parameters, namely temperature and time. Thermal control is based on the On-Off method with hysteresis to optimize stability. Experimental validation, focused on PLA filament, included mechanical tensile and flexural tests. The results demonstrated that the humidified filament suffered a significant reduction in stiffness and mechanical strength. Following the drying process in the prototype, the mechanical properties were significantly restored, proving the device's effectiveness in partially reversing moisture-induced damage and recovering the material's quality for additive manufacturing.

Keywords: thermoplastics; temperature control; humidity; microcontrollers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição e tamanho dos defeitos observados em peças impressas em diferentes níveis de umidade relativa.....	18
Figura 2 – Correlação entre o conteúdo de vazios e as propriedades mecânicas das peças.....	19
Figura 3 – <i>Drybox</i> Creality	20
Figura 4 – Estrutura de um microcontrolador.	21
Figura 5 – Placa bluepill STM32F103C8T6	22
Figura 6 – Sensor DHT22	25
Figura 7 – Célula de carga e módulo HX711	26
Figura 8 – Diagrama de blocos de componentes de um sistema de controle de temperatura em uma sala.....	27
Figura 9 – Sistema de controle liga-desliga.....	28
Figura 10 – Histerese	28
Figura 11 – Cooler 4020 axial	29
Figura 12 – Placa de aquecimento PTC.....	29
Figura 13 – <i>Display</i> TFT ST7735.....	30
Figura 14 – <i>Encoder</i> rotativo KY-040.....	31
Figura 15 – Esquemático elétrico	33
Figura 16 – Layout do circuito PCB.....	34
Figura 17 – Projeto 3D do Case Externo	35
Figura 18 – Projeto 3D do Case Interno	35
Figura 19 – Fluxograma da estrutura do firmware e interface para o usuário..	37
Figura 20 – Fluxograma do sistema de aquecimento	39
Figura 21 – Fluxograma do controle de ventilação	41
Figura 22 – Fluxograma do temporizador regressivo	42
Figura 23 – Fluxograma da medição de massa	44
Figura 24 – Balança de Precisão Marte AD5002	48
Figura 25 – Pesos de referência.....	48
Figura 26 – Aferições apresentadas no <i>display</i>	49
Figura 27 – Termômetro infravermelho a laser SOLDEN TD-580.....	51
Figura 28 – Medição do termômetro infravermelho a laser SOLDEN TD-580 ...	52
Figura 29 – Teste de tração e flexão.....	53
Figura 30 – Texturômetro TA.HDplus	53
Figura 31 – PCB confeccionada na CNC.....	55

Figura 32 – PCB com os componentes eletrônicos soldados	56
Figura 33 – Case externo	57
Figura 34 – Compartimento interno do Case	57
Figura 35 – Diferença visual entre peças feitas com filamento seco e úmido..	58
Figura 36 – Corpos de prova do grupo padrão.....	59
Figura 37 – Corpos de prova com filamento úmido por 48 horas.....	59
Figura 38 – Umidade interna da câmara ao fim da secagem do filamento.....	60
Figura 39 – Corpos de prova do grupo seco (Seco por 5 horas a 50°C)	60
Figura 40 – Gráfico Tensão x Deformação (Ensaio de Tração).....	61
Figura 41 – Gráfico Força x Deflexão (Ensaio de Flexão).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados calibração da balança.....	50
Tabela 2 – Tensão x Deformação (Ensaio de Tração).....	62
Tabela 3 – Força x Deflexão (Ensaio de Flexão).....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Manufatura Aditiva e o Desafio da Umidade	15
2.1.1	Impressão 3D	15
2.1.2	Filamentos Termoplásticos.....	15
<u>2.1.2.1</u>	<u>Poli (ácido láctico)</u>	<u>16</u>
<u>2.1.2.2</u>	<u>Acrilonitrila Butadieno Estireno</u>	<u>16</u>
<u>2.1.2.3</u>	<u>Politereftalato de Etileno Glicol</u>	<u>17</u>
2.1.3	O Impacto da Umidade nos Filamentos Termoplásticos	17
2.1.4	Métodos de Secagem de Filamentos	19
2.2	Arquitetura de Sistemas Embarcados	20
2.2.1	Definição de Microcontroladores (MCU) e Arquitetura ARM Cortex.....	20
<u>2.2.1.1</u>	<u>STM32F103C8T6</u>	<u>21</u>
2.2.2	Periféricos Fundamentais de um Microcontrolador	22
<u>2.2.2.1</u>	<u>Portas de Entrada e Saída de Propósito Geral (GPIO)</u>	<u>22</u>
<u>2.2.2.2</u>	<u>Temporizadores (Timers)</u>	<u>23</u>
<u>2.2.2.3</u>	<u>Comunicação Serial Periférica (SPI)</u>	<u>24</u>
2.3	Princípios de Sensoriamento	24
2.3.1	Medição de Temperatura e Umidade	24
2.3.2	Medição de Massa e Condicionamento de Sinais	25
2.4	Teoria de Controle e Acionamento	26
2.4.1	Sistemas de Controle em Malha Fechada.....	27
2.4.2	Controle Liga-Desliga (<i>On-Off</i>) e o Uso da Histerese.....	27
2.4.3	Transferência de Calor por Convecção Forçada	28
2.5	Interfaces Homem-Máquina (IHM)	30
2.5.1	Displays Gráficos (TFT).....	30
2.5.2	<i>Encoders</i> Rotativos Incrementais	31
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	32
3.1	Desenvolvimento e Construção do <i>Hardware</i>	32
3.1.1	Dispositivos e interconexões	32
3.1.2	Esquemático Elétrico do Dispositivo.....	33
3.1.3	Montagem da Placa de Circuito Impresso	33
3.1.4	Estrutura Física do Protótipo	34

3.2	Implementação do <i>software</i> embarcado	36
3.2.1	Estrutura do <i>firmware</i> e interface para o usuário.....	36
3.2.2	Sistema de gerenciamento térmico	38
<u>3.2.2.1</u>	<u>Controle de aquecimento</u>	<u>38</u>
<u>3.2.2.2</u>	<u>Controle de ventilação.....</u>	<u>40</u>
3.2.3	Temporizador regressivo	42
3.2.4	Medição de massa	43
3.2.5	Cálculos e Conversões Implementados	46
<u>3.2.5.1</u>	<u>Cálculo do sensor DHT22 e transformação dos valores para °C</u>	<u>46</u>
<u>3.2.5.2</u>	<u>Cálculo do HX711 e conversão dos valores para gramas</u>	<u>47</u>
3.3	Metodologia de Validação Experimental	48
3.3.1	Teste de Calibração e Precisão da Balança.....	48
3.3.2	Teste de Estabilidade do Controle de Temperatura	50
3.3.3	Teste de Secagem	52
4	RESULTADOS.....	55
4.1	Construção e montagem do protótipo	55
4.1.1	Placa de Circuito Impresso (PCB).....	55
4.1.2	Montagem do Case e Disposição Interna.....	56
4.2	Validação da eficácia da secagem	58
4.2.1	Análise Visual da Qualidade de Impressão	58
4.2.2	Análise dos Ensaios Mecânicos Quantitativos	61
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D tem revolucionado diversos setores industriais e domésticos, possibilitando a criação de peças personalizadas e funcionais com custos relativamente baixos. Contudo, a qualidade final das peças depende diretamente das condições do filamento utilizado, sendo que fatores como umidade e quantidade de material disponível afetam de forma significativa a resistência e durabilidade do produto. Neste contexto, o desenvolvimento de um sistema integrado que realize a secagem eficiente e a medição precisa do peso do filamento torna-se essencial para garantir a consistência e a excelência das impressões. (Arce, 2019; Lendvai et al., 2024).

O problema principal identificado é a dificuldade dos usuários de impressão 3D em manter os filamentos em condições ideais, especialmente em ambientes com alta umidade. Isso resulta em defeitos estruturais e mecânicos nas peças impressas (Lendvai et al., 2024). Além disso, a falta de controle sobre a quantidade exata de material disponível frequentemente leva ao desperdício de recursos ou à interrupção do processo de impressão. Assim, parte-se da hipótese de que um sistema microcontrolado, que combine secagem eficiente e monitoramento de peso, pode resolver essas limitações, proporcionando maior controle e eficiência no uso dos filamentos.

A relevância deste trabalho reside na crescente popularidade da impressão 3D e na necessidade de soluções acessíveis e sustentáveis para melhorar o desempenho do processo. A maioria dos métodos atualmente disponíveis para a secagem de filamentos é onerosa, ineficaz ou exige infraestrutura inadequada para pequenos fabricantes ou usuários domésticos (Briežnik, Žáková e Huba, 2023). O sistema proposto visa suprir essa lacuna, oferecendo uma alternativa prática, econômica e de fácil uso, contribuindo para a redução de desperdícios e alinhando-se com práticas mais sustentáveis na manufatura aditiva.

Este projeto teve como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema microcontrolado capaz de realizar a secagem e medição do peso do filamento PLA utilizado para impressão 3D, mantendo a qualidade e durabilidade do filamento e das peças produzidas. Os objetivos específicos buscados são:

- Desenvolvimento de um sistema para controle de temperatura e tempo de secagem;

- Criação de uma interface para visualização em tempo real da temperatura, umidade e peso;
- Implementação de predefinições de parâmetros;
- Análise da secagem do filamento com a realização dos ensaios de tração e flexão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manufatura Aditiva e o Desafio da Umidade

Esta seção aborda os fundamentos da impressão 3D por FDM e os termoplásticos mais comuns. Foca-se em como a umidade impacta negativamente o material, gerando defeitos e reduzindo as propriedades mecânicas das peças. Por fim, são revisados os métodos de secagem de filamentos.

2.1.1 Impressão 3D

Em linhas gerais, a impressão 3D trata-se de um processo que envolve diversas etapas. Inicialmente é criado um modelo tridimensional, tal modelo é gerado através do sistema CAD (Desenho Auxiliado por Computador), após a criação do modelo, ele é transferido para um sistema CAM (Manufatura Auxiliado por Computador), o objeto digital passa por um procedimento de fatiamento em camadas, sendo assim enviado para a impressora 3D (Besko, Bilyk, Sieben, 2017).

A impressora 3D, ao receber um arquivo 3D “fatiado”, começa a etapa de impressão, onde uma bobina de filamento termoplástico é ligado a extrusora, nela contendo um bico aquecido, onde chega à temperatura de fusão do filamento, permitindo assim a vazão da matéria-prima com ajuda de um sistema mecânico sobre a superfície da mesa de impressão, aquecida conforme necessário, ocorrendo o depósito de material camada acima de camada, da base ao topo, até a peça final ser concluída (Besko, Bilyk, Sieben, 2017).

O método mais comum e de custo baixo em impressoras 3D é o Fused Deposition Modeling, ou FDM. Essa tecnologia permite a criação de protótipos operacionais, modelos conceituais e componentes prontos para aplicação, utilizando termoplásticos padrões, de engenharia e considerados materiais de alto desempenho. Sendo uma tecnologia de impressão 3D profissional que faz a utilização de termoplásticos com qualidade de produção, as peças geradas apresentam resistência térmica, mecânica e química excepcionais (Briežnik, Žakova e Huba, 2023).

2.1.2 Filamentos Termoplásticos

Segundo (Besko, Bilyk, Sieben, 2017), ao abordar os filamentos para impressão 3D, os termoplásticos mais adotados são PLA, ABS e PETG. Os utilizadores destes termoplásticos geralmente analisam as características técnicas,

dentre os quais resistência, durabilidade e custos, desprezando a toxicidade e consumo de energia necessária para a fabricação dos objetos e sua devida reciclagem.

2.1.2.1 Poli (ácido láctico)

O ácido polilático (PLA) é um dos filamentos mais utilizados em impressoras, pois necessita de uma menor temperatura de impressão comparado com ABS, dispensando também o uso de mesa aquecida para que se realize a impressão. Trata-se de um termoplástico biodegradável, biocompatível e feito de fontes renováveis, como amido de milho e cana-de-açúcar, sendo assim, não possui toxicidade aos seres humanos. (Brito, 2011)

Zhao et al. (2022) esclarece que, sendo proveniente de matérias orgânicas, o PLA é um dos filamentos mais promissores e estima-se o aumento de sua utilização nos ramos de embalagens, medicina e das mais diversas necessidades diárias. Os produtos usados nessas áreas ao serem descartados, degradam em água e dióxido de carbono.

Possui uma alta resistência mecânica, em contrapartida tem baixa resistência ao calor e absorve umidade facilmente, tendo uma temperatura de deflexão de calor (HDT) na faixa de 55-65°C, e umidade relativa do ar de no máximo 30%, se tornando um termoplástico ineficiente em aplicações com temperatura e umidade elevadas como afirmador por Zhao et al. (2022).

2.1.2.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno

De acordo com Sousa (2022), o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) é o termoplástico mais comumente utilizado na impressão 3D, por ser o filamento com menor custo dentre os demais, além de possuir características que o destacam como excelentes propriedades mecânicas: resistência elevada a temperatura, força, e resistência a impactos.

A maior desvantagem desse filamento fica relacionada a sua toxicidade, liberando fumaça no processo de impressão, que se não for resolvida pode intoxicar o operador da impressora, por esta razão, deve-se operar este filamento em uma área ventilada ou com impressora fechada com filtro de toxinas. Outra desvantagem, é o fato do mesmo ser derivado do petróleo, não sendo biodegradável (Briežnik, Žakova e Huba, 2023).

Wiebeck e Harada (2005) abordam os valores de temperatura suportados por este filamento não ultrapassam os 80°C, a partir desta temperatura pode-se observar deformação. Além do mesmo ser inflamável, queimando com muita facilidade, com formação de fuligem elevada e não se extingue.

2.1.2.3 Politereftalato de Etileno Glicol

Santana et al. (2018) discutem os aspectos de que o politereftalato de etileno glicol (PETG), é um dos filamentos que mais vem crescendo no âmbito de impressão 3D, possuindo uma ótima durabilidade e flexibilidade, mesclando as características do ABS, tendo maior resistência, e do PLA, pois é um filamento de fácil impressão.

De maneira geral, o polímero PETG suporta uma temperatura aproximada a 80°C, assim como no ABS, a partir dessa faixa de temperatura há deformação no material. Tem propriedades mecânicas muito próximas ao PET, tendo como vantagens, sua flexibilidade e alta capacidade de processamento (Santana et al., 2018).

Assim como observado no PLA, o PETG possui características hidrocópicas, demandando de maior atenção a locais com muita umidade. Trata-se de um material reciclável e não emitem odores ou substâncias tóxicas durante o processo de impressão 3D como afirmado por Besko, Bilyk, Sieben (2017).

2.1.3 O Impacto da Umidade nos Filamentos Termoplásticos

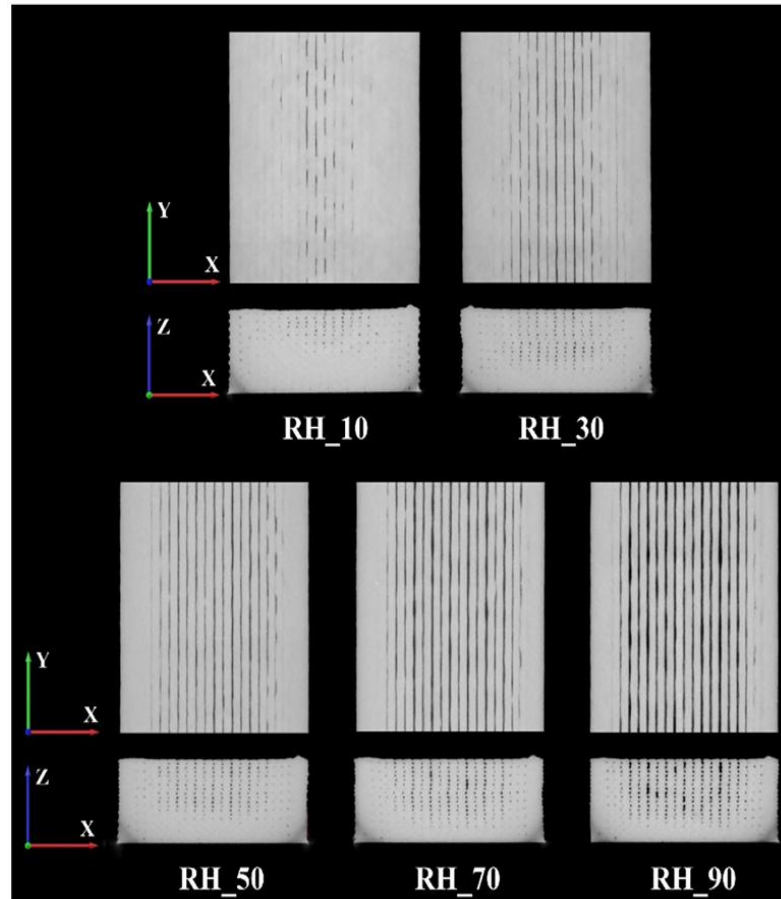
Segundo Arce (2019), ao armazenar os filamentos, os usuários precisam levar em consideração condições como umidade e temperatura, tais condições modificam as propriedades físico-químicas dos filamentos, e estão relacionadas diretamente com a qualidade e resistência do material e do produto impresso.

A medida de comparação, um filamento com umidade, pode perder até 8% na força de ruptura e 49% no módulo de elasticidade, diminuindo assim drasticamente a resistência das peças impressas (Abreu, Carvalho, 2023).

Conforme apontado por Lendvai, Fekete, Jakab et al. (2024), a umidade relativa (UR) do ambiente durante o armazenamento de filamentos afeta de forma significativa as características das peças produzidas por impressão 3D. A tomografia computadorizada indicou que o aumento da UR eleva a porosidade, como ilustrado na Figura 1, que apresenta a distribuição e o tamanho dos defeitos. Esse

comportamento ocorre devido à subextrusão e ao inchaço do material, sendo que, em condições de UR superiores a 70%, também aparecem defeitos esféricos, originados pelo aprisionamento de vapor.

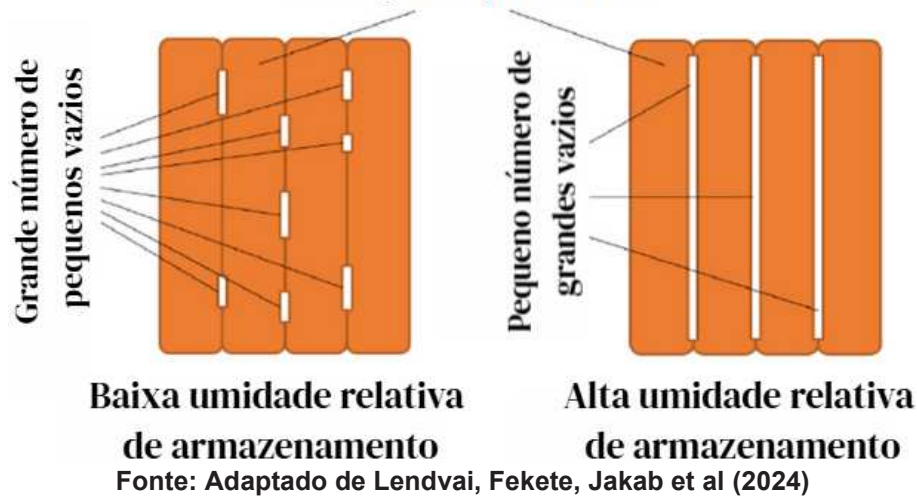
Figura 1 – Distribuição e tamanho dos defeitos observados em peças impressas em diferentes níveis de umidade relativa.



Fonte: Lendvai, Fekete, Jakab et al (2024)

Essa porosidade tem impacto direto nas propriedades mecânicas das peças. A resistência e o módulo à flexão reduzem-se proporcionalmente ao crescimento dos vazios, enquanto a resistência ao impacto sofre uma queda ainda mais significativa devido à concentração de tensões causadas pelos defeitos estruturais. Na Figura 2, é possível observar a relação entre o conteúdo de vazios e as alterações nas propriedades mecânicas.

Figura 2 – Correlação entre o conteúdo de vazios e as propriedades mecânicas das peças.
Peças impressas



Os efeitos da umidade sobre o material concentram-se na integridade estrutural, sendo principalmente relacionados à formação de porosidades. Os resultados ressaltam a importância de manter o filamento em condições controladas para assegurar a qualidade das peças impressas (Lendvai, Fekete, Jakab et al., 2024).

2.1.4 Métodos de Secagem de Filamentos

Como destaca Briežnik, Žakova e Huba (2023) o método mais comum para prevenir a umidade de um filamento seria uma caixa selada com sílica gel, sendo esta mais hidrocópica que o próprio filamento. Porém este método possui uma grande desvantagem, uma vez que o material fique úmido, ele perde suas características e fica inutilizável, pois este método não possibilita a secagem do material.

O segundo método, trata-se de uma forma genérica de secagem, pois usuários amadores utilizam forno de cozinha para realização do procedimento de desumidificação. O sistema tem um elevado consumo de energia, tempo de secagem aproximadamente 12 horas e após a utilização, o forno necessita de desinfecção.

Como terceira opção, secadoras *drybox* apresentada na Figura 3 . Este dispositivo tem capacidade de secar até mesmo os filamentos que já estão úmidos e reaver suas propriedades mecânicas perdidas no processo da umidificação sendo essa sua principal característica (Briežnik, Žakova e Huba 2023).

Figura 3 – Drybox Creality



Fonte: Creality (2024)

Para isso, algumas dryboxes utilizam uma resistência elétrica na câmara de secagem, controlando temperatura e tempo para reduzir a umidade do filamento. Widyianto et al. (2025) desenvolveram um sistema de secagem eficiente que, ao operar a 45°C por 6 horas, reduziu a umidade para 0,39%, restaurando a resistência mecânica do material. O estudo também mostrou que temperaturas excessivas podem comprometer a integridade estrutural do filamento, reforçando a importância do controle térmico no processo de secagem.

2.2 Arquitetura de Sistemas Embarcados

Este capítulo apresenta a arquitetura do sistema embarcado. Inicia-se com a definição de microcontrolador (MCU) e, em seguida, detalha o componente central do projeto, o STM32F103C8T6. Por fim, é abordada a teoria de operação dos periféricos de hardware essenciais utilizados.

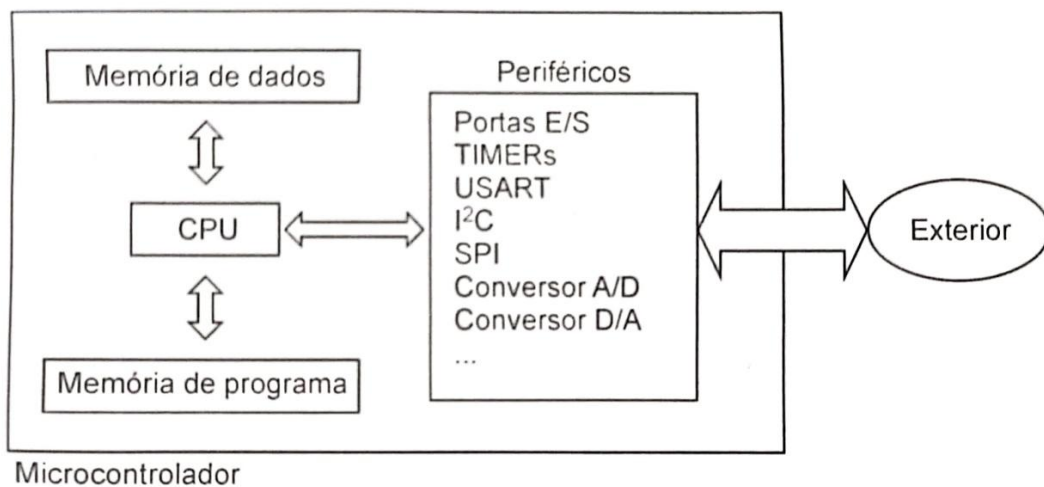
2.2.1 Definição de Microcontroladores (MCU) e Arquitetura ARM Cortex

Segundo Miyadaira (2013), os microcontroladores (μ C ou MCU) são dispositivos eletrônicos integrados que incorporam uma forma de “inteligência” embarcada, sendo compostos essencialmente por uma unidade central de processamento (CPU – Central Processing Unit), memórias destinadas ao armazenamento de dados e programas, e um conjunto de periféricos — como portas

de entrada e saída (E/S), interfaces SPI (Serial Peripheral Interface) e USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter), entre outros como apresentado na Figura 4.

Esses dispositivos apresentam dimensões reduzidas em virtude da utilização de circuitos integrados (CIs), nos quais múltiplos componentes eletrônicos são implementados em uma única lâmina de silício, resultando em uma estrutura compacta, eficiente e de baixo consumo de energia (Miyadaira, 2013).

Figura 4 – Estrutura de um microcontrolador.



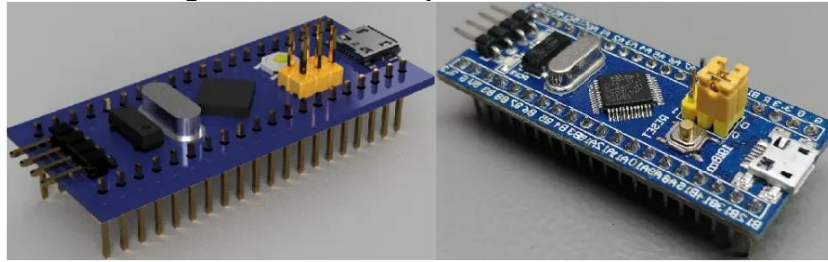
Fonte: Miyadaira (2013)

2.2.1.1 STM32F103C8T6

O microcontrolador selecionado para este projeto foi o STM32F103C8T6, um componente da família "Performance line" da STMicroelectronics, baseado na arquitetura ARM Cortex-M3 (STMicroelectronics, 2007). Esta plataforma é reconhecida por seu alto desempenho e baixo custo, sendo uma escolha popular para uma vasta gama de aplicações embarcadas (Salih et al., 2023; Brown, 2012).

Este microcontrolador é comumente disponibilizado na placa de desenvolvimento *Blue Pill* apresentada na Figura 4. Esta placa compacta facilita o acesso à maioria dos pinos de I/O do microcontrolador, tornando-a uma plataforma comum para prototipagem rápida e aplicações acadêmicas (Silva, 2020).

Figura 5 – Placa bluepill STM32F103C8T6



Fonte: Artigo sobre STM32F103C8T6 Silva (2020)

O núcleo do dispositivo é uma CPU ARM 32-bit Cortex-M3, capaz de operar a uma frequência máxima de 72 MHz. A designação "C8" indica que o componente específico possui 64 Kbytes de memória *Flash* embarcada (para armazenamento do código) e 20 Kbytes de SRAM (para dados e pilha) (STMicroelectronics, 2007).

A principal vantagem desta família de microcontroladores é seu extenso conjunto de periféricos de *hardware*, que são conectados à CPU através de barramentos de alta velocidade (AHB) e barramentos de periféricos (APB1 e APB2) (Brown, 2012). O STM32F103C8T6 inclui até quatro temporizadores de 16 bits, dois ADCs de 12 bits, e múltiplas interfaces de comunicação, como SPI, I²C e USARTs, além de até 37 portas de I/O rápidas e algumas sendo tolerantes a 5V (STMicroelectronics, 2007).

2.2.2 Periféricos Fundamentais de um Microcontrolador

Esta subseção detalha a teoria de operação dos três periféricos de hardware essenciais utilizados no projeto. Serão abordadas as Portas de Entrada e Saída (GPIO), usadas para ler sinais e controlar atuadores; os Temporizadores (*Timers*), que gerenciam a contagem de tempo e a leitura do *encoder*; e a Comunicação Serial Periférica (SPI), barramento de alta velocidade usado para a interface com o *display* TFT.

2.2.2.1 Portas de Entrada e Saída de Propósito Geral (GPIO)

As portas de entrada e saída de propósito geral (GPIO) são os periféricos fundamentais para a interação do microcontrolador com o hardware externo, como botões, LEDs e outros módulos (Brown, 2012).

Cada pino de GPIO pode ser configurado por software para operar em diversos modos distintos. No modo entrada (*Input*), o pino é usado para ler o estado de um sinal digital. Para garantir um estado lógico definido quando o pino está desconectado, o microcontrolador permite configurar resistores internos de *pull-up* (puxando o pino para nível alto) ou *pull-down* (puxando para nível baixo) (STMicroelectronics, 2007)

No modo saída (*Output*), o microcontrolador define o nível lógico do pino para controlar atuadores. A configuração pode ser *push-pull* (capaz de fornecer e drenar corrente ativamente) ou *open-drain* (capaz apenas de drenar corrente para o GND, exigindo um resistor de *pull-up* externo para atingir o nível alto) (STMicroelectronics, 2007). Finalmente, os pinos podem ser configurados em modo de função alternativa, onde o controle do pino é entregue a um periférico de hardware, como um USART (para TX/RX) ou um SPI (para SCK/MOSI/MISO) (Brown, 2012).

2.2.2.2 Temporizadores (*Timers*)

Os periféricos de temporização (*Timers*) são componentes de hardware fundamentais em microcontroladores, pois podem operar de duas maneiras principais: como temporizadores ou como contadores (Miyadaira, 2013).

Na sua função como temporizador, o periférico é configurado para medir o tempo decorrido entre eventos ou, mais comumente, para gerar sinais ou interrupções em intervalos de tempo precisos. Uma forma dessa aplicação é o acionamento periódico de uma válvula solenóide (Miyadaira, 2013). Essa capacidade de gerar eventos periódicos foi a base teórica utilizada neste projeto para criar a interrupção de um segundo do cronômetro regressivo.

Na sua segunda função, como contador, o timer é configurado para registrar o número de ocorrências de um evento externo. Miyadaira (2013) cita como a contagem de produtos em uma esteira industrial é feita. Este mesmo princípio de contagem de eventos externos é o fundamento que permite ao microcontrolador utilizar o hardware do timer para decodificar e contar os pulsos gerados por um *encoder* rotativo.

2.2.2.3 Comunicação Serial Periférica (SPI)

Segundo Miyadaira (2013) a Interface Serial Periférica (SPI) é um protocolo de comunicação síncrono onde um dispositivo mestre (como o MCU) controla a troca de dados com um ou mais periféricos (Escravos - *Slaves*). O barramento utiliza tipicamente quatro linhas: SCLK (*Serial Clock*) e SS (*Slave Select*) para controle, e duas linhas de dados, MOSI (*Master Out Slave In*) e MISO (*Master In Slave Out*), que permitem a transferência de dados em modo *full-duplex*. Esta interface é uma escolha comum para periféricos que exigem alta taxa de transferência de dados, como controladores de *displays* TFT.

O princípio de funcionamento do SPI baseia-se em registradores de deslocamento (*shift registers*) internos, presentes tanto no *master* quanto no *slave*. A comunicação é iniciada quando o *master* ativa um *slave* específico, forçando seu pino SS para nível lógico baixo. A cada pulso de *clock* no SCLK, o *master* envia um *bit* pelo pino MOSI ao *slave* e, simultaneamente, o escravo envia um *bit* pelo pino MISO ao mestre. Como demonstrado no livro-base, após 8 pulsos de *clock*, os registradores de 8 bits do *master* e do *slave* terão trocado seus conteúdos (Miyadaira, 2013).

Para que a comunicação ocorra corretamente, o mestre e o escravo devem estar configurados para o mesmo modo de operação. O padrão SPI define quatro modos distintos, que são definidos pela combinação da polaridade de *clock* (CPOL) (que define se o sinal de *clock* é alto ou baixo quando em repouso) e da fase de *clock* (CPHA) (que define se os dados são amostrados na borda de subida ou na borda de descida do *clock*) (Miyadaira, 2013).

2.3 Princípios de Sensoriamento

Este capítulo aborda os princípios teóricos dos sensores de monitoramento do protótipo. Primeiramente, será detalhado o sistema de medição de temperatura e umidade, baseado no sensor DHT22. Em seguida, será explicado o funcionamento do sistema de medição de massa, que utiliza uma célula de carga com extensômetros e o módulo condicionador de sinal HX711.

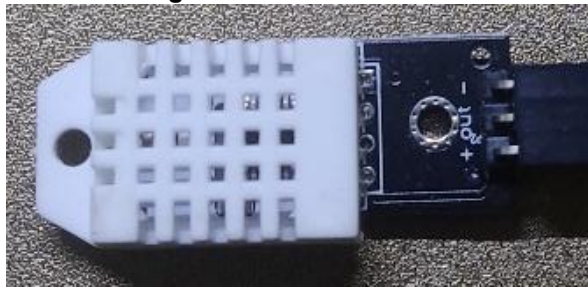
2.3.1 Medição de Temperatura e Umidade

Sensores térmicos são dispositivos que reagem à variação da temperatura. Um tipo comum é o termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*), cuja resistência

diminui com o aumento da temperatura. Para a medição de umidade, sensores capacitivos detectam mudanças na constante dielétrica de um material dielétrico à medida que ele absorve umidade do ar (Wendling, 2010).

O sensor DHT22 (Figura 6) é um componente de baixo custo que integra ambos os princípios, fornecendo uma saída digital calibrada para temperatura (via NTC) e umidade (via sensor capacitivo) (Ahmad et al., 2021).

Figura 6 – Sensor DHT22



Fonte: Autoria própria (2025)

Estudos comparativos feitos por Ahmad et al., (2021) sobre o DHT22 destacam sua boa precisão ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) e ampla faixa de operação (-40°C a 80°C) em relação a outros sensores de baixo custo, como o DHT11. Em testes de laboratório contra equipamentos industriais (Keithley 6517-TP), foi observado que o DHT22 fornece medições de temperatura precisas e estáveis em ambientes com temperatura constante.

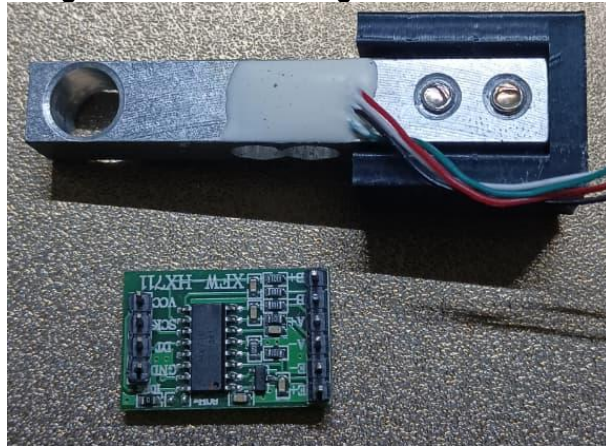
A principal limitação identificada para o DHT22 é sua baixa velocidade de resposta, levando vários minutos para se estabilizar após mudanças bruscas de temperatura, o que o torna inadequado para aplicações que exigem detecção rápida. Contudo, o mesmo estudo conclui que o sensor é "mais adequado para monitorar a temperatura ambiente em um ambiente com mudanças graduais de temperatura" (Ahmad et al., 2021).

2.3.2 Medição de Massa e Condicionamento de Sinais

Em projetos de automação, a medição de massa é frequentemente realizada por células de carga junto a módulos de conversão analógico digital específicos (Figura 7), que são transdutores que convertem a força (peso) em um sinal elétrico. A tecnologia mais comum nestes dispositivos é o extensômetro (*strain gauge*), um sensor cuja resistência elétrica varia quando ele é deformado (esticado ou

comprimido) junto com o corpo da célula. Para medir essa variação, que é muito pequena, os extensômetros são ligados em uma configuração de Ponte de *Wheatstone*, que gera uma tensão de saída proporcional à força aplicada (Costa, 2023).

Figura 7 – Célula de carga e módulo HX711



Fonte: Autoria própria (2025)

O sinal de tensão analógico gerado pela Ponte de *Wheatstone* é muito baixo (na ordem de milivolts) e, por isso, não pode ser lido diretamente por um microcontrolador, além de ser muito suscetível a ruídos elétricos. Para solucionar isso, é indispensável uma etapa de condicionamento de sinal, que consiste em amplificar e digitalizar o sinal analógico fraco para que ele possa ser processado digitalmente.

Para realizar o condicionamento, utilizam-se módulos conversores analógico-digitais (ADC) específicos, como o HX711. Este módulo é ideal para a aplicação por integrar em um único *chip* os dois componentes necessários: um amplificador de ganho programável (PGA), que amplifica o sinal fraco, e um ADC de alta resolução (24 bits), que converte o sinal amplificado em um valor digital de alta precisão. Para aumentar a estabilidade contra ruídos e vibrações, aplica-se adicionalmente um filtro de média móvel por *software*, que consiste em calcular a média de várias leituras consecutivas para obter um valor final estável (Costa, 2023).

2.4 Teoria de Controle e Acionamento

O foco deste capítulo é na teoria de controle e na transferência de calor aplicadas ao sistema. Inicia-se com o conceito de controle em malha fechada e, em

seguida, detalha-se o método Liga-Desliga (*On-Off*) com histerese, que é a estratégia utilizada para gerenciar o aquecedor. Por fim, é explicada a teoria da transferência de calor por convecção forçada, que fundamenta o uso do *cooler* para a distribuição de ar quente na câmara.

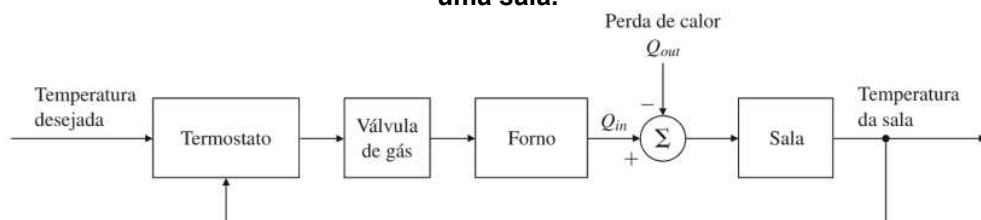
2.4.1 Sistemas de Controle em Malha Fechada

Na engenharia moderna é crucial o uso de controles automatizados. Tais controles são utilizados em várias áreas da engenharia, como no controle de temperatura, umidade, operações industriais, pressão etc. Dentre as teorias mais usadas, pode-se destacar a teoria de controle clássico, teoria de controle moderno e teoria de controle robusto. (OGATA, 2010).

Ogata (2010) ressalta que, o controle em malha aberta é mais adequado para situações em que não há influência de perturbações externas e a entrada do sistema é previamente definida. Em contrapartida, sistemas que enfrentam interferências externas tendem a se beneficiar de um controle em malha fechada, já que este utiliza realimentação contínua para ajustar a resposta do sistema ao valor desejado.

A Figura 8 mostra um exemplo prático de um controle de malha fechada, onde um forno doméstico com termostato mede a temperatura do ambiente e compara com o valor de referência, ativando ou desativando o aquecimento para manter a temperatura desejada. O processo controlado é a sala, e a perturbação é o fluxo de calor externo, e o atuador sendo diretamente responsável por influenciar diretamente a variável controlada.

Figura 8 – Diagrama de blocos de componentes de um sistema de controle de temperatura em uma sala.



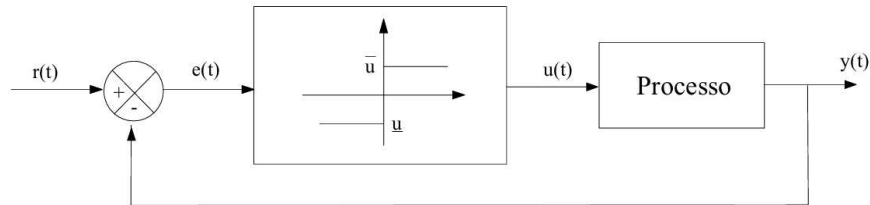
Fonte: Franklin, Powell, Emami-Naeini (2013)

2.4.2 Controle Liga-Desliga (*On-Off*) e o Uso da Histerese

Conforme descrito por Bazanella e da Silva Junior (2006), o controlador liga e desliga trata-se de um sistema com sinal de controle $u(t)$ que pode assumir apenas dois valores fixos, ligado (\bar{u}) ou desligado (\underline{u}), diretamente dependendo do erro $e(t)$.

Este método apresenta inconsistências no valor do *set point*, que submetidos a ruídos no sistema, podem causar chaveamentos indesejados aos relés. A Figura 9 apresenta um sistema liga-desliga típico, e a Equação 1 descreve o comportamento matemático.

Figura 9 – Sistema de controle liga-desliga

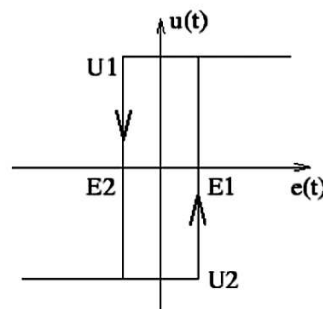


Fonte: Bazanella e Da Silva Junior (2006)

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

Para solucionar o problema de chaveamentos excessivos e oscilações no sistema de controle liga-desliga, Bazanella e Da Silva Junior (2006) citam a necessidade do uso da histerese (Figura 10). Esta técnica introduz uma faixa de erro definida por dois limites: E1 e E2, em que para o sistema alterar o estado, o erro precisa atingir um desses limites. Ou seja, para que o controle altere o estado de ligado para desligado, o erro precisa ser menor que E2, e para voltar de desligado para ligado, seja maior que E1.

Figura 10 – Histerese



Fonte: Bazanella e Da Silva Junior (2005)

2.4.3 Transferência de Calor por Convecção Forçada

A transferência de calor por convecção ocorre quando há um fluido em movimento em contato com uma superfície a uma temperatura diferente. O movimento deste fluido é crucial para a taxa de transferência de calor, pois ele "carrega" o calor

da superfície mais quente para longe, permitindo que mais calor seja transferido continuamente.

Boabaid Neto (2010) explica que existem duas classificações principais para a convecção, baseadas na origem do movimento do fluido: natural e forçada. A convecção natural ocorre devido a diferenças de densidade no fluido causadas pelo próprio aquecimento, o fluido mais quente torna-se menos denso e sobe, enquanto o fluido mais frio desce, criando correntes de circulação natural.

Já a convecção forçada ocorre quando o movimento do fluido é provocado por meios externos, como *coolers* ou bombas (Figura 11).

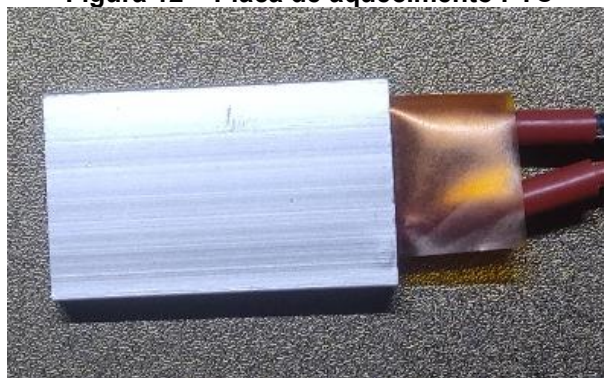
Figura 11 – Cooler 4020 axial



Fonte: A autoria própria (2025)

Ao utilizar um *cooler*, por exemplo, força-se o ar a passar com maior velocidade sobre a superfície de troca térmica, como uma resistência PTC (Figura 12). Conforme descrito por Boabaid Neto (2010), esse aumento na velocidade do fluido intensifica a taxa na qual o calor é removido ou fornecido à superfície, tornando a convecção forçada significativamente mais eficaz do que a convecção natural.

Figura 12 – Placa de aquecimento PTC



Fonte: A autoria própria (2025)

2.5 Interfaces Homem-Máquina (IHM)

A interface homem-máquina (IHM) é um componente essencial em sistemas embarcados, pois permite ao usuário interagir com o dispositivo. Uma das formas mais comuns de IHM é o uso de *displays* de cristal líquido (LCD), que evoluíram de simples displays de caracteres para módulos gráficos avançados (Souza, 2014).

2.5.1 Displays Gráficos (TFT)

Os *displays* TFT (*Thin-Film Transistor*), como o ST7735 apresentado na Figura 13, são um tipo de LCD gráfico que permite a exibição de imagens complexas, coloridas e de alta resolução, sendo ideais para interfaces que necessitam apresentar mais do que apenas texto.

O funcionamento desses *displays* é baseado em um controlador gráfico dedicado (como o ST7735) que é integrado ao módulo da tela. Este controlador possui sua própria memória interna (*Display RAM*) e é responsável por gerenciar cada pixel individualmente na tela. O microcontrolador não controla os pixels diretamente; em vez disso, ele se comunica com o controlador do *display*.

A comunicação entre o MCU e o controlador da tela é comumente realizada por um barramento serial, como o SPI (*Serial Peripheral Interface*), para economizar pinos. Neste método, o MCU envia "comandos" para o controlador, instruindo-o sobre o que fazer como limpar a tela ou desenhar um pixel, seguidos dos dados necessários como o valor da cor. Um pino de controle adicional chamado DC ou A0, é usado para diferenciar se o *byte* enviado pelo barramento SPI é um comando ou um dado (Souza, 2014).

Figura 13 – Display TFT ST7735



Fonte: Autoria própria (2025)

2.5.2 Encoders Rotativos Incrementais

O *encoder* rotativo incremental, como o módulo KY-040 (Figura 14), é um dispositivo de entrada para interfaces homem-máquina (IHM) modernas. Ele funciona como um interruptor rotativo que envia dados sobre sua posição atual para o microcontrolador, permitindo que o usuário ajuste valores ou navegue em menus de forma intuitiva. Além da rotação, módulos como o KY-040 frequentemente incluem um botão de pressão (*push-button*) no eixo (Joy-IT, 2017).

Figura 14 – Encoder rotativo KY-040



Fonte: Autoria própria (2025)

O princípio de funcionamento do *encoder* incremental baseia-se em dois pinos de saída, comumente chamados de CLK (Sinal A) e DT (Sinal B). O *datasheet* do KY-040 explica que, a cada passo (*step*) da rotação, apenas um dos dois sinais (A ou B) muda seu estado lógico (de 0 para 1, ou de 1 para 0) por vez. Essa sequência de mudanças defasadas é conhecida como codificação em quadratura (Joy-IT, 2017).

A grande vantagem desse método de codificação é a capacidade de detectar a direção da rotação. Ao monitorar qual dos dois sinais (A ou B) mudou seu estado primeiro, o microcontrolador pode determinar se o eixo está sendo girado no sentido horário ou anti-horário. O fabricante especifica que no sentido horário o pino A (CLK) mudará primeiro, enquanto no sentido anti-horário o pino B (DT) mudará primeiro (Joy-IT, 2017).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O capítulo descreve o processo de construção e implementação do protótipo. A metodologia foi descrita em duas partes principais: o desenvolvimento do hardware, onde mostra com detalhes a construção física e eletrônica do dispositivo, e a implementação do software embarcado, que explica a lógica de controle responsável por cada funcionalidade dele.

3.1 Desenvolvimento e Construção do *Hardware*

3.1.1 Dispositivos e interconexões

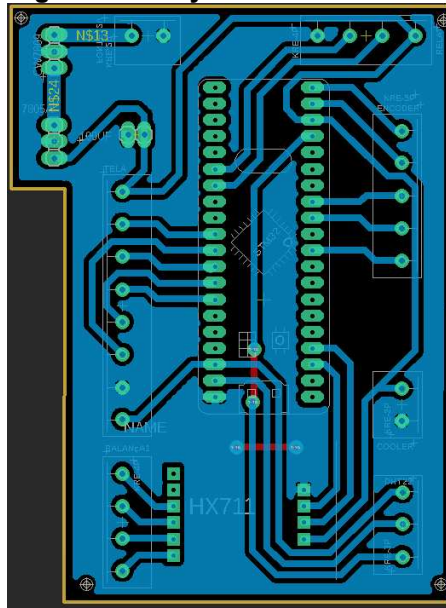
O sistema de hardware do protótipo foi desenvolvido em torno da placa blue pill que integra o microcontrolador STM32F103C8T6, que atua como unidade central de processamento. A alimentação do sistema utiliza uma fonte chaveada de 12V para a placa PTC e dois reguladores de tensão, onde um rebaixa a tensão de 12 V para 9V e outro de 9V para 5V, que são necessários para energizar os periféricos e o microcontrolador.

Os periféricos utilizados no sistema e suas respectivas funções são descritos como:

- DHT22: sensor responsável pela medição de temperatura e umidade relativa do ar dentro da câmara de secagem.
- Célula de carga e módulo HX711: conjunto responsável pela medição da massa do filamento.
- *Encoder* rotativo KY-040: dispositivo de entrada utilizado para a navegação no menu e ajuste dos parâmetros pelo usuário.
- Display TFT ST7735: interface de saída visual para exibição dos dados medidos, status e menu de configuração.
- Módulo relé de 2 canais: responsável pelo acionamento (liga/desliga) da placa de aquecimento PTC e do *cooler*.
- Placa de aquecimento PTC: atuador responsável por gerar o calor para a secagem.
- *Cooler* 4020 axial: atuador responsável pela circulação forçada do ar aquecido.

foram implementados na camada inferior facilitando a ligação dos componentes ao GND. A camada superior serve apenas como referência visual para a soldagem de jumpers, necessários para resolver cruzamentos de trilhas inevitáveis no *design* face simples. A disposição dos componentes priorizou a acessibilidade dos conectores KRE nas bordas e o uso de barramentos fêmeas para os módulos principais, para os demais componentes foram utilizados furos passantes para soldá-los diretamente.

Figura 16 – Layout do circuito PCB

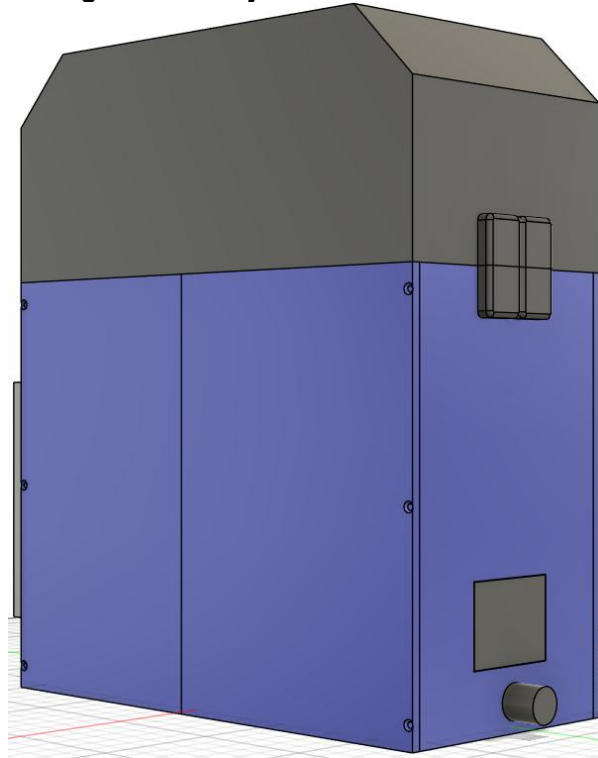


Fonte: Autoria própria (2025)

3.1.4 Estrutura Física do Protótipo

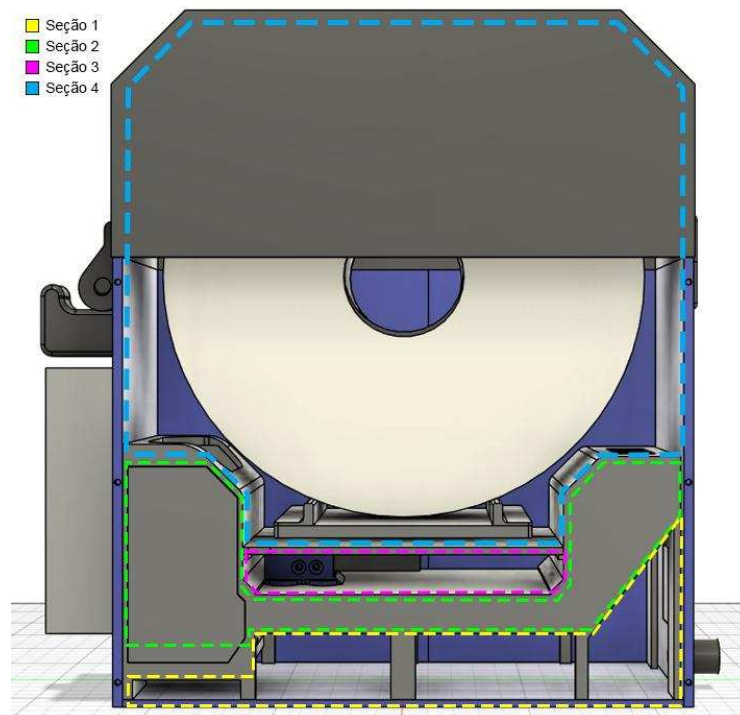
Utilizando o *software* Fusion 360, foi realizada a modelagem 3D do invólucro (*case*) do projeto. Uma estrutura funcional para a proteção dos componentes eletrônicos.

O *design* externo do *case*, apresentado na Figura 17, foi desenvolvido com foco na usabilidade e clareza, para proporcionar uma operação intuitiva, como os elementos de interface homem-máquina, posicionado na parte frontal do invólucro, temos o *encoder* rotativo abaixo da tela, para que o usuário consiga navegar no menu sem grandes dificuldades. A parte superior representada na cor preta, temos a tampa do *case*, que o usuário utiliza para acessar a câmara de secagem e posicionamento da bobina de filamento.

Figura 17 – Projeto 3D do Case Externo

Fonte: Autoria Própria (2025)

A Figura 18 representa a parte interna do projeto, que foi dividido em quatro seções, otimizando o funcionamento e promovendo a segurança dos componentes.

Figura 18 – Projeto 3D do Case Interno

Fonte: Autoria Própria (2025)

A seguir estão as descrições das seções internas do involucro:

1. Compartimento eletrônico (seção 1): próxima a base do *case*, foi designada para armazenar grande parte dos elementos eletrônicos utilizados, incluindo a PCB, relés, display, *encoder* rotativo, promovendo um ambiente seguro e isolado termicamente da câmara de aquecimento e secagem.
2. Câmara de aquecimento (seção 2): ainda no interior do involucro, logo acima da seção um, temos a câmara de aquecimento, onde estão localizados a resistência e o *cooler*, proporcionando com que a corrente de ar quente circule para a câmara de secagem (Seção 4).
3. Plataforma de pesagem (seção 3): localizada no centro desta seção, a câmara de pesagem abriga a célula de carga, utilizada para pesagem de massa dos carretéis. Um sistema que minimizou a transferência de temperatura da câmara de secagem para o sensor de peso, evitando possíveis erros na medição de massa.
4. Câmara de secagem (seção 4): localizada na parte superior, onde são posicionadas as bobinas. O ar quente vindo da câmara de aquecimento é forçado a circular por esta seção, realizando a diminuição de umidade na câmara e conseqüentemente no filamento da bobina armazenada.

3.2 Implementação do *software* embarcado

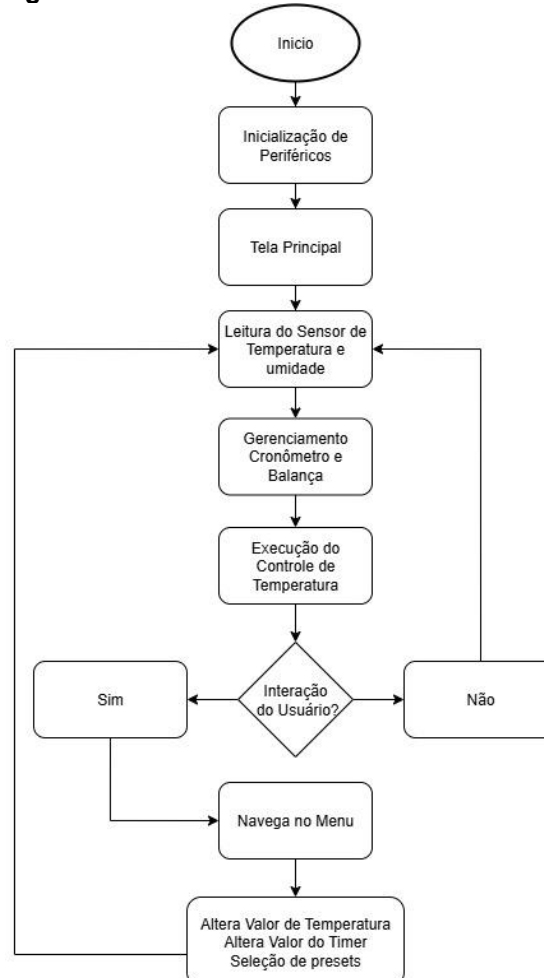
O desenvolvimento do *firmware* foi realizado em linguagem C utilizando a STM32CubeIDE, baseado em uma máquina de estados finita, é responsável por executar toda a lógica de controle e monitoramento do sistema. Ele faz a leitura dos dados dos sensores, gerencia toda a interface e comanda todos os atuadores responsáveis por realizar o processo de secagem.

3.2.1 Estrutura do *firmware* e interface para o usuário

O *firmware* conta com um fluxo principal, que está sempre ativo, realizando a leitura dos sensores e atualizando as informações. O sistema de navegação no menu principal é gerenciado por uma máquina de estados, controlada pelo usuário ao

movimentar o *encoder* rotativo. O fluxograma da Figura 19 mostra o funcionamento da arquitetura geral, como o sistema altera entre os estados de configuração (*Timer*, Temperatura, Peso e as predefinições).

Figura 19 – Fluxograma da estrutura do firmware e interface para o usuário



Fonte: Autoria Própria (2025)

A seguir estão as principais etapas do fluxo do software embarcado desenvolvido e suas respectivas descrições:

1. Inicialização: Quando o sistema é energizado, o sistema executa uma rotina de inicialização que configura todos os periféricos, sendo elas, a interface de comunicação (*display*), *timers* e as portas de entrada/saída (GPIOs). Assim que o *display* é inicializado a tela principal é desenhada.
2. Interação do Usuário: Verificação contínua da interação do usuário com o *encoder* rotativo.

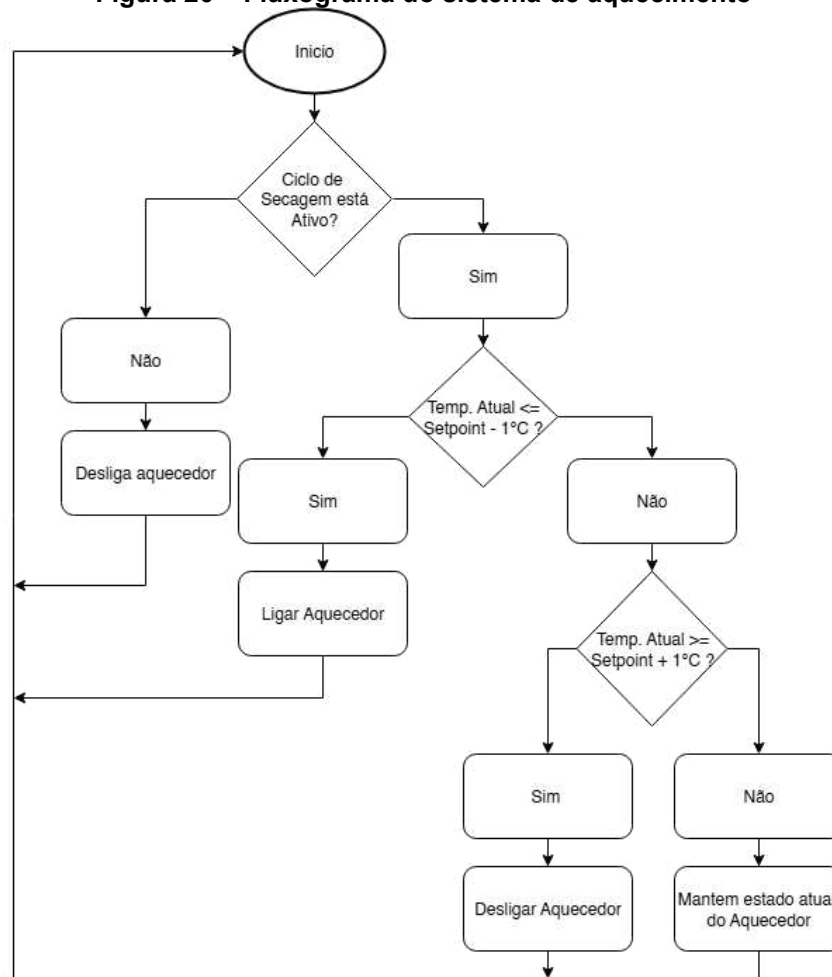
3. Leitura dos Sensores: A cada ciclo, o *firmware* realiza a leitura do sensor de temperatura e umidade, obtendo os dados das leituras mais recentes do ambiente interno da câmara de secagem.
4. Gerenciamento do Cronômetro: As rotinas de gerenciamento do cronômetro são chamadas para a devida atualização de valores de tempo restante, assim são atualizados em tempo real no *display*.
5. Gerenciamento de Pesagem: Implementa um sistema de dois estágios (Tara e Peso) para garantir a precisão e compensar a deriva térmica. O primeiro clique do usuário na opção peso aciona a rotina de tara, que captura o ponto zero atual. O segundo clique aciona a rotina pesar, que mede a massa e utiliza a tara recém aferida para calcular o valor final, que é então exibido no *display*.
6. Controle de Temperatura: O controle de temperatura é executado para verificação da necessidade do acionamento ou desligamento dos atuadores (resistência e *cooler*), com base nos dados coletados pelo sensor de temperatura e umidade.
7. Transição de Estado: Caso uma interação do usuário seja detectada, a máquina de estados avalia qual o estado atual do sistema, e determina a transição para um novo estado.
8. Repetir Ciclo: Após a execução de todas as tarefas do ciclo, o processo retorna ao estado inicial, garantindo a atualização constante e o monitoramento em tempo real.

3.2.2 Sistema de gerenciamento térmico

3.2.2.1 Controle de aquecimento

O principal controle do sistema e o mais crítico é o de temperatura da câmara de secagem. Para tal controle, foi implementada um método de controle *ON-OFF* (liga e desliga) com histerese, cuja logica operacional é detalhada no fluxograma da Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma do sistema de aquecimento



Fonte: Autoria Própria (2025)

A rotina de controle opera da seguinte forma:

1. Verificação de Atividade: O processo inicia verificando se um ciclo de secagem está ativo. Esta é uma verificação de segurança importante, verificando que o aquecimento só ocorra quando o usuário comandar.
2. Cenário Inativo: Caso o ciclo de secagem não esteja ativo, o sistema envia um comando para desligar o aquecedor, assim a resistência PTC permanece desenergizada e o processo retorna à verificação de atividade.
3. Cenário Ativo e Verificação do Limite Inferior: Se o ciclo de secagem estiver ativo, o sistema prossegue para a primeira condição de controle: verifica se a temperatura da câmara de secagem é menor ou igual ao limite inferior da histerese (*Setpoint* - 1°C).
4. Acionamento do Aquecedor: Se a condição anterior for verdadeira, um comando é enviado para ligar o aquecedor, iniciando o processo de

aquecimento da câmara de secagem, e conseqüentemente retornando a etapa de verificação de atividade.

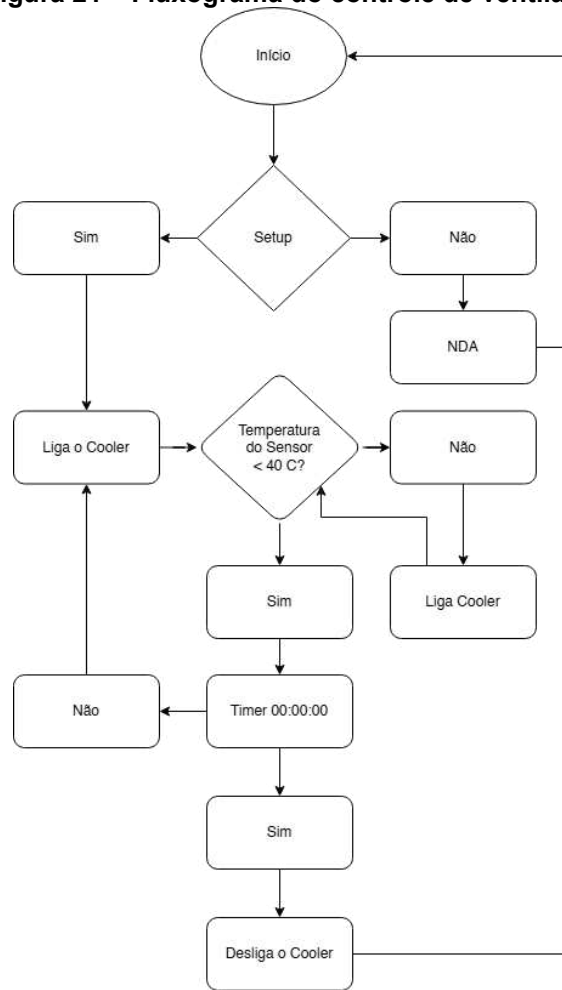
5. Verificação do Limite Superior: Se a condição anterior for falsa e a temperatura não for menor ou igual ao limite inferior, a lógica segue para a segunda condição de controle, onde ocorre a verificação da temperatura atual sendo maior ou igual ao limite superior da histerese (*Setpoint* + 1°C).
6. Desacionamento do Aquecedor: Se a condição de limite superior for atendida, o sistema envia um comando para desligar o aquecedor, interrompendo o aquecimento da câmara. O processo então retorna a etapa inicial.
7. Manutenção de Estado (Banda Morta): Se nenhuma das condições anteriores foram atendidas, a temperatura se encontra dentro da faixa de histerese. Neste caso nenhuma ação é tomada e o sistema mantém o estado atual do aquecedor, sendo este desligado ou ligado. O processo retorna a etapa inicial.

A estratégia de controle foi crucial para o funcionamento ideal do sistema de aquecimento, pois evita o chaveamento excessivo dos relés, um problema comum em controles *ON-OFF*, o que conseqüentemente aumenta a vida útil dos componentes e maior estabilidade térmica na câmara.

3.2.2.2 Controle de ventilação

O sistema de ventilação (*cooler*) tem duas funções principais, tais quais a circulação de ar forçada dentro da câmara de aquecimento e a devida proteção da resistência após o término do ciclo de secagem, pois o mesmo só desliga quando a temperatura da câmara de aquecimento estiver em níveis seguros. A lógica é apresentada na Figura 21 e suas etapas são detalhadas na sequência.

Figura 21 – Fluxograma do controle de ventilação



Fonte: Autoria Própria (2025)

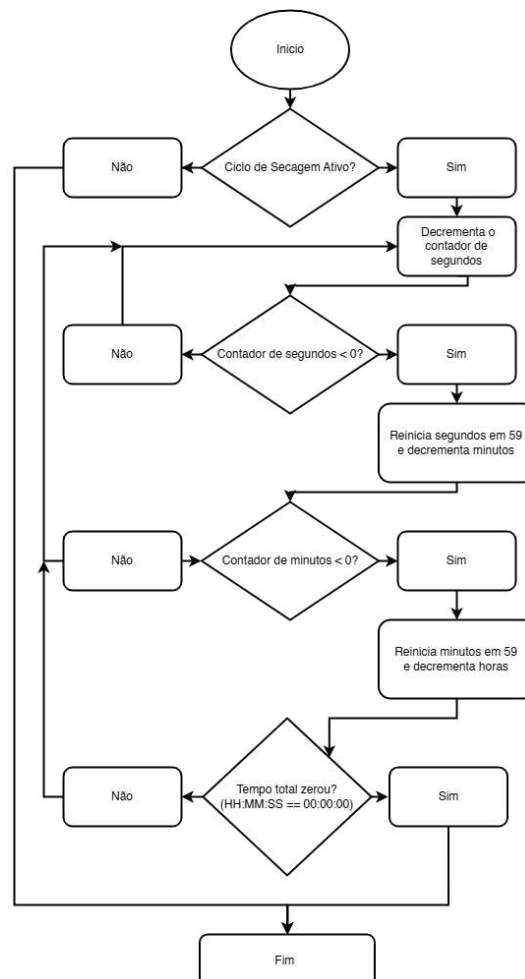
1. Início: Sistema inicializado.
2. Verificação do *Setup*: O sistema então verifica se o *timer* está ativo e a temperatura foi definida.
3. Ação *Setup* Atingida: Se a verificação for verdadeira, o *cooler* então é acionado.
4. Ação *Setup* não Atingida: Se a verificação for falsa, nada acontece e o sistema volta ao início.
5. Verificação de Temperatura para Resfriamento: O sistema verifica se a temperatura medida pelo sensor é menor que 40 graus celsius.
6. Ação Sistema Quente: A verificação sendo falsa, o sistema liga o *cooler* e retorna para a condição de verificação de temperatura.
7. Ação Sistema Frio: A verificação sendo verdadeira, o sistema avança para próxima etapa para a verificação se timer não está ativo.
8. Verificação Final do *Timer*: O sistema verifica se o "*Timer* 00:00:00?".

9. Ação Sistema Frio e Temporizador Zerado: Se a condição for atendida, o *cooler* é desligado e volta ao início.
10. Ação Sistema Frio e *Timer* não Zerado: Se a condição do *timer* não for atendida, o *cooler* é mantido ligado e volta para a análise de temperatura.

3.2.3 Temporizador regressivo

Para a gestão do tempo de secagem, foi utilizado um dos periféricos de *hardware* do microcontrolador, o *timer*, que foi configurado para gerar interrupções a cada segundo como ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma do temporizador regressivo



Fonte: Autoria Própria (2025)

Essa abordagem permitiu que a contagem de tempo de secagem ocorresse em segundo plano, sem interferir no processamento principal do sistema, como leitura

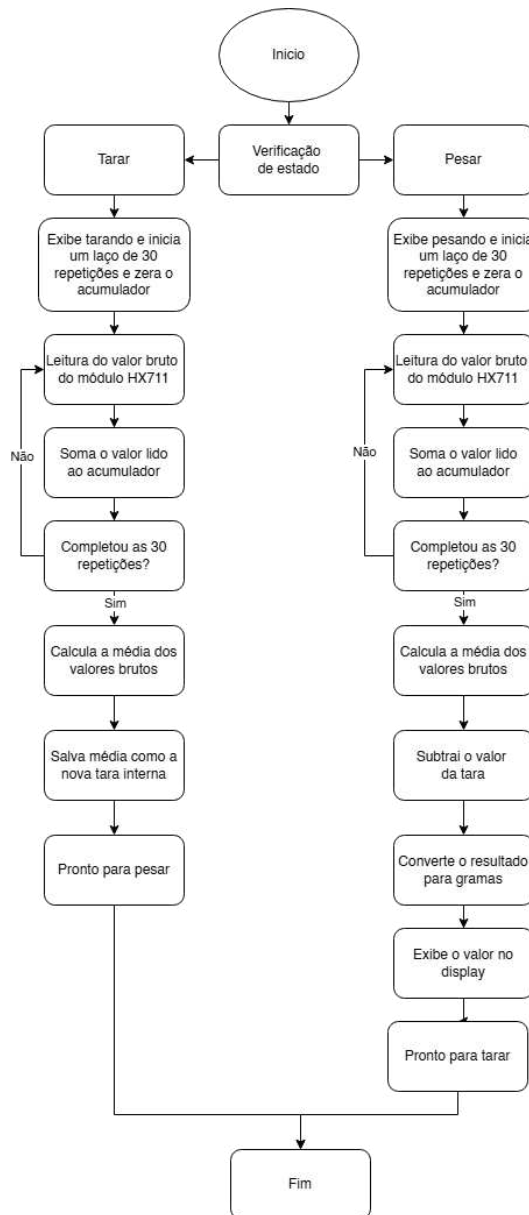
de sensores ou atualizações no *display*. A lógica do temporizador regressivo opera da seguinte forma:

1. Início: O processo é iniciado.
2. Verificação do Ciclo de Secagem: O sistema verifica a condição de ciclo de secagem, se está ativo ou ocioso.
3. Ciclo Ocioso: Caso a condição de ciclo ocioso for atendida, a rotina é imediatamente finalizada, aguardando a próxima interrupção.
4. Ciclo Ativo: Se a condição de ciclo ativo for atendida, o sistema decrementa o contador de segundos.
5. Verificação da Virada dos Minutos: O sistema verifica se o contador de segundos é menor que zero, ou seja, tomou um valor negativo, caso a condição for verdadeira o contador de segundos é reiniciado em 59 o valor dos minutos é decrementado, se a condição não for atendida o sistema parte para a análise do contador de segundos.
6. Verificação da Virada das Horas: Verifica se o contador de minutos é menor que zero, se a condição for atendida, o contador de minutos é reiniciado em 59 e decrementa uma hora, o sistema avança para a verificação de término do ciclo se a condição foi atendida ou não.
7. Verificação de Término do Ciclo: Após todos os ajustes, o sistema verifica se a condição de tempo total zerado foi atendida, se for verdadeira, o tempo de secagem acabou, então o sistema desliga os atuadores e segue para a etapa fim.
8. Fim: O sistema finaliza e volta ao início.

3.2.4 Medição de massa

Como apresentado na Figura 23, o firmware implementa um algoritmo de filtragem digital e um sistema de medição em dois estágios (Tara/Peso), gerenciado por um indicador de estado interno. Esta abordagem foi desenvolvida para compensar a deriva térmica do sensor e atenuar ruídos, permitindo ao usuário acionar duas rotinas distintas através da mesma opção de menu.

Figura 23 – Fluxograma da medição de massa



Fonte: Autoria Própria (2025)

A lógica do processo, após ser acionada a função de pesagem pelo usuário, e detalhada a seguir:

1. Início: O processo de pesagem é chamado pelo usuário.
2. Verificação de Estado: O sistema avalia um indicador de estado interno para determinar se este é o primeiro clique para tarar ou o segundo para pesar. Com base nessa verificação, o sistema executa uma das duas rotinas:

Estado de Tara (Primeiro Clique):

3. Inicialização do Filtro (Tara): O sistema exibe tarando e se prepara para a leitura, executando um laço de 30 repetições e zerando o acumulador, sendo este uma variável interna utilizada para somar os valores obtidos.
4. Leitura do Valor Bruto (Tara): Realiza a leitura do valor bruto obtido pelo módulo HX711.
5. Acumulação dos Valores (Tara): O valor lido é somado à variável acumuladora.
6. Verificação do Laço (Tara): Se a condição de 30 repetições não for atendida, o sistema retorna para etapa de leitura do valor bruto. A condição sendo verdadeira, o laço é encerrado.
7. Cálculo da Média (Tara): Neste passo é realizada a média aritmética dos valores brutos obtidos, dividindo o valor total da variável acumuladora por trinta. Este passo é crucial para atenuar efeitos adversos, tais como os efeitos dos ruídos elétricos.
8. Salvamento da Tara: A média obtida (o valor de *offset*) é salva internamente para ser usada na rotina de pesagem.
9. Atualização de Estado: O indicador de estado é atualizado para pronto para pesar.

Estado de Pesagem (Segundo Clique):

10. Inicialização do Filtro (Peso): O sistema exibe pesando e se prepara para a leitura, executando um novo laço de 30 repetições e zerando o acumulador.
11. Leitura do Valor Bruto (Peso): Realiza a leitura do valor bruto obtido pelo módulo HX711.
12. Acumulação dos Valores (Peso): O valor lido é somado à variável acumuladora.
13. Verificação do Laço (Peso): Se a condição de 30 repetições não for atendida, o sistema retorna para etapa de leitura do valor bruto. A condição sendo verdadeira, o laço é encerrado.

14. Cálculo da Média (Peso): Neste passo é realizada a média aritmética dos valores brutos obtidos.
15. Aplicação da Tara: O valor da tara salvo na rotina anterior, é subtraído da média recém calculada.
16. Conversão para Gramas: O resultado obtido é processado e aplica-se um fator de calibração que transforma o valor digital filtrado em uma unidade de massa real.
17. Exibição no Display: O valor final em gramas é então enviado para a ação de exibição no *display*.
18. Reinício de Estado: O indicador de estado é reiniciado para pronto para tarar.
19. Fim: A função de pesagem é concluída e o sistema retorna ao seu ciclo principal de monitoramento.

3.2.5 Cálculos e Conversões Implementados

3.2.5.1 Cálculo do sensor DHT22 e transformação dos valores para °C

Para a obtenção da temperatura o sensor utiliza um modulo que avalia os valores em *bits* e faz uma soma e uma multiplicação entre esses valores para a amostragem em números reais, onde o sensor capta estes valores em variações de tensão. A Equação 2 traz o comportamento do modulo para obtenção dos valores em *bit* que depende de dois campos do pacote de dados: o terceiro *byte* (valor inteiro da temperatura) e o quarto *byte* (valor decimal da temperatura).

$$T_{bit} = (T_{inteiro} \times 256) + T_{decimal} \quad (2)$$

A Equação 3 exibe a forma utilizada para transformar o valor da temperatura de *bit* para uma grandeza conhecida do nosso sistema internacional, o valor em *bit* é dividido pelo valor 10. Isso é feito para ajustar a casa decimal, já que a resolução do sensor é de 0.1°C.

$$Temperatura \text{ em } ^\circ\text{C} = \frac{T_{bit}}{10} \quad (3)$$

A obtenção da umidade segue o mesmo princípio, onde o modulo capta os valores em variação de tensão. A Equação 4 traz o comportamento do modulo para obtenção dos valores em *bit* que depende de dois campos do pacote de dados: o primeiro *byte* (valor inteiro da umidade) e o segundo *byte* (valor decimal da umidade).

$$RH_{bit} = (RH_{inteiro} \times 256) + RH_{decimal} \quad (4)$$

Agora para transformar o valor da umidade de bit para uma grandeza conhecida do nosso sistema internacional, o (RH_{bit}) é dividido por 10, para ajustar a casa decimal de acordo com a resolução de 0.1%RH do sensor como apresentado na Equação 5.

$$Umidade \text{ em \%RH} = \frac{RH_{bit}}{10} \quad (5)$$

3.2.5.2 Cálculo do HX711 e conversão dos valores para gramas

O HX711 é um conversor analógico-digital (ADC) de 24 bits de precisão. Sua função é pegar a tensão analógica vinda da célula de carga e transformá-la em um número digital bruto de 24 bits. O microcontrolador lê este valor e usa os pulsos de comunicação para configurar qual canal de entrada e quais ganhos (128, 64 ou 32) serão utilizados na próxima medição.

O valor digital enviado pelo módulo não tem unidade, para isto é feita a conversão para gramas utilizando um processo de calibração linear. Primeiro, um fator de calibração definido como variável (Coeficiente) é calculado utilizando o valor digital recebido pelo módulo (Valor HX711 conhecido) o dividindo por um peso de calibração conhecido (Peso conhecido). Este coeficiente representa quantas contagens brutas do sensor equivalem a uma grama é mostrado na Equação 6.

$$Coeficiente = \frac{Valor \ HX711 \ conhecido}{Peso \ conhecido} \quad (6)$$

Quando a pesagem é executada, o código lê o sensor 30 vezes e tira uma média (valor médio bruto) para estabilizar a leitura. Para encontrar o peso final, Equação 7, o programa aplica a equação de calibração, onde o valor médio bruto tem o valor de "zero" da balança (tara) subtraído e divide o resultado pelo coeficiente.

$$\text{Peso em gramas} = \frac{\text{Valor medio bruto} - \text{Tara}}{\text{Coeficiente}} \quad (7)$$

3.3 Metodologia de Validação Experimental

3.3.1 Teste de Calibração e Precisão da Balança

Para o teste de calibração e precisão da balança, foram utilizadas massas-padrão (peso de metal) do laboratório de física da UTFPR. Essas massas foram aferidas em uma balança de precisão Marte AD5002 apresentada na Figura 24, pertencente ao mesmo laboratório.

Figura 24 – Balança de Precisão Marte AD5002



Fonte: Marte (2025)

Ao realizar a medição, foram obtidos os seguintes valores de referência (Figura 25):

Figura 25 – Pesos de referência



Fonte: Autoria Própria (2025)

- 1 peso: 102.57 g
- 3 pesos: 282.60 g
- 6 pesos: 506.17 g

Estes valores obtidos são utilizados para a validação da balança e para o cálculo do erro.

Para a aferição do sistema de pesagem, primeiro foi realizado o ajuste de calibração linear, utilizando uma massa-padrão de 506.17 g para definir o fator de calibração no *firmware*. Concluída a calibração, iniciou-se a verificação da precisão. Para este teste, foram utilizadas as três massas-padrão (1, 3 e 6 pesos) em temperatura ambiente.

Em cada medição, a função de tara foi acionada com a plataforma vazia, e em seguida a massa foi posicionada para a medição de peso, conforme a lógica implementada. A Figura 26 apresenta as aferições apresentadas pelo *display* no momento das medições.

Figura 26 – Aferições apresentadas no *display*



Fonte: Autoria Própria (2025)

A Tabela 1 apresenta os resultados desta verificação, comparando o valor de referência (real) com o valor medido e o erro percentual calculado para cada ponto.

Tabela 1 – Resultados calibração da balança

Conjunto (Massa-padrão)	Valor de referência (g)	Valor Medido (g)	Erro Absoluto (g)	Erro Percentual (%)
1 peso	102.57	98	4.57	4.4555
3 pesos	282.60	280	2.60	0.9200
6 pesos	506.17	507	0.83	0.1639

Fonte: Autoria Própria (2025)

A seguir estão as equações 8 e 9 utilizadas para o cálculo do erro absoluto e do erro percentual apresentados na tabela:

$$\text{Erro absoluto (g)} = \text{Valor medido} - \text{Valor de referência} \quad (8)$$

$$\text{Erro Percentual (\%)} = \frac{\text{Erro absoluto}}{\text{Valor de referência}} * 100 \quad (9)$$

A aferição da eficácia da tara dinâmica contra a deriva térmica, um segundo teste foi conduzido. O dispositivo foi ativado no modo de secagem e configurado para 50°C. Após 47 minutos de aquecimento, com a câmara estabilizada termicamente, a função de tara foi acionada. Imediatamente após, a massa-padrão de 506.16 g foi posicionada na balança, e o sistema reportou uma leitura de 509 g. Este resultado, muito próximo ao obtido em temperatura ambiente, comprova que a implementação da tara em dois estágios é eficaz em compensar a deriva térmica do sensor, permitindo medições de massa mesmo durante o processo de secagem.

3.3.2 Teste de Estabilidade do Controle de Temperatura

A aferição do sistema de medição de temperatura, composto por um sensor DHT22, foi realizada por comparação. Utilizou-se o termômetro infravermelho a laser SOLDEN TD-580 (Figura 27) como equipamento de referência. As leituras de temperatura do DHT22 dentro da câmara de secagem foram registradas e comparadas com as medições obtidas pelo dispositivo de medição a laser comercial. O erro do sensor foi então calculado com base na diferença entre essas duas medições.

Figura 27 – Termômetro infravermelho a laser SOLDEN TD-580



Fonte: Autoria Própria (2025)

Embora o controle de histerese estivesse programado para uma banda de 1°C , a temperatura real da câmara variou aproximadamente 2°C ao redor do *setpoint*. Concluiu-se que esta variação não se trata de um erro de medição do sensor DHT22, mas sim uma consequência direta da inércia térmica do dissipador de calor. Devido à sua massa elevada, o dissipador continua a irradiar calor mesmo após a resistência ser desligada, causando *overshoot* e demora a transferir calor efetivo quando ligado, causando *undershoot*, resultando na oscilação observada.

A Figura 28 apresenta a medição do termômetro infravermelho, foi configurado com uma emissividade de 0.90 (Valor utilizado para plásticos), posteriormente o sistema foi configurado para uma temperatura de 50 graus e ao realizar a aferição com o termômetro constatou-se uma temperatura dentro da câmara de secagem de 48.7°C , nota-se que a temperatura marcada pelo sensor DHT22, também era 48°C , tal temperatura se deve ao fato de que ao abrir a tampa para medição, parte do calor escapa da câmara para o ambiente, mesmo a aferição sendo feita de forma rápida.

Figura 28 – Medição do termômetro infravermelho a laser SOLDEN TD-580

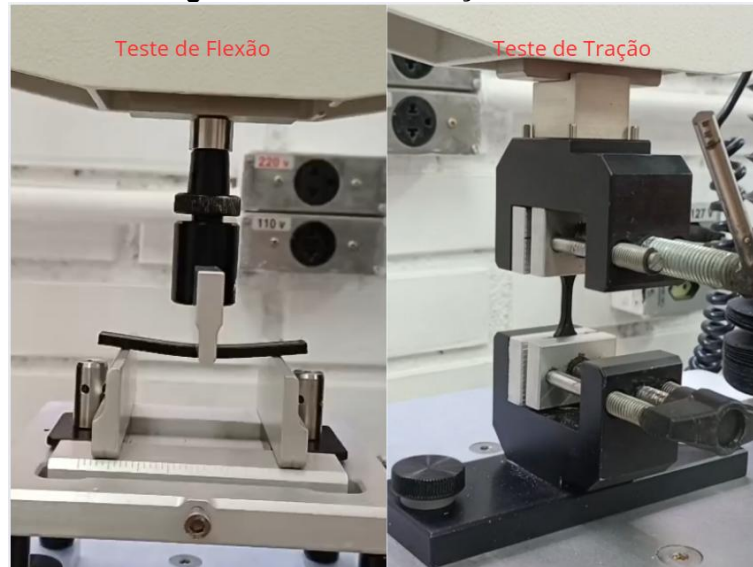


Fonte: Aatoria Própria (2025)

3.3.3 Teste de Secagem

O teste de secagem foi focado no filamento PLA, por ser o mais hidrocópico dos materiais abordados. O experimento foi separado em três grupos distintos: o grupo padrão, no qual foram impressos corpos de prova com o filamento recém tirado do saco a vácuo e com sílica gel, em seguida, o grupo úmido, onde o filamento passou por uma umidificação intensa de 48 horas dentro de uma caixa com um umidificador ligado, após a umidificação foi então realizada a impressão dos corpos de prova, e por fim, o grupo seco, onde o mesmo filamento umidificado passou por uma secagem no protótipo de 5 horas a 50 graus, sendo então impressos os corpos de prova secos.

Para cada um dos três grupos experimentais, foram impressos 8 corpos de prova: 4 para ensaio de tração seguindo a norma ASTM D638 (norma que define como fazer o teste de tração em plásticos) e 4 para ensaio de flexão seguindo a norma ISO 178 (norma que define como fazer o teste de flexão). A Figura 29 apresenta os testes de tração e flexão realizados.

Figura 29 – Teste de tração e flexão

Fonte: Autoria Própria (2025)

Os ensaios mecânicos foram realizados utilizando o texturômetro modelo TA.HDplus apresentado na Figura 30, fabricado pela Stable Micro Systems presente na universidade UTFPR. Este é um analisador de textura universal de coluna dupla, projetado para ensaios de alta capacidade que exigem forças elevadas, sendo ideal para testes de compressão, tração e flexão. para a posterior análise comparativa das propriedades mecânicas.

Figura 30 – Texturômetro TA.HDplus

Fonte: Autoria Própria (2025)

O equipamento possui especificações de alta precisão, incluindo uma capacidade máxima de força de 750 kg.f (7,5 kN), uma faixa de velocidade operacional de 0,01 a 20 mm/s e uma resolução de distância de 0,001 mm. A aquisição de dados é realizada a uma taxa de 2000 pontos por segundo (pps), permitindo uma análise detalhada do comportamento mecânico das amostras, que é gerenciada pelo *software* Exponent Connect.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados práticos obtidos com o desenvolvimento do protótipo, divididos em duas etapas principais. A primeira seção (4.1) detalha a construção física e montagem final do dispositivo e a segunda seção (4.2) foca na validação experimental da eficácia do protótipo, apresentando tanto a análise visual da qualidade de impressão quanto a análise quantitativa dos ensaios mecânicos.

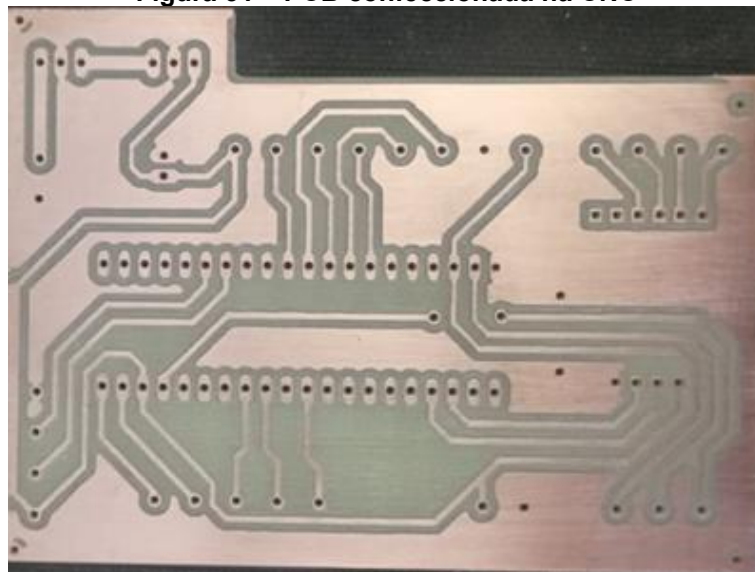
4.1 Construção e montagem do protótipo

Esta seção aborda a fabricação da Placa de Circuito Impresso (PCB) e a montagem final do case que abriga todo o sistema.

4.1.1 Placa de Circuito Impresso (PCB)

Para a consolidação do hardware do projeto, foi projetada uma placa de circuito impresso (PCB) dedicada. O objetivo desta etapa foi criar uma montagem permanente para os componentes eletrônicos, substituindo a montagem anterior em *proto-board*. Esta última, por sua natureza, apresentava limitações operacionais, como maus contatos e suscetibilidade a interferências, que prejudicavam a execução dos testes. A confecção da placa foi realizada através do processo de fresagem em uma fresadora CNC (Controle Numérico Computadorizado) disponível na UTFPR. A Figura 31 ilustra a placa de circuito impresso finalizada.

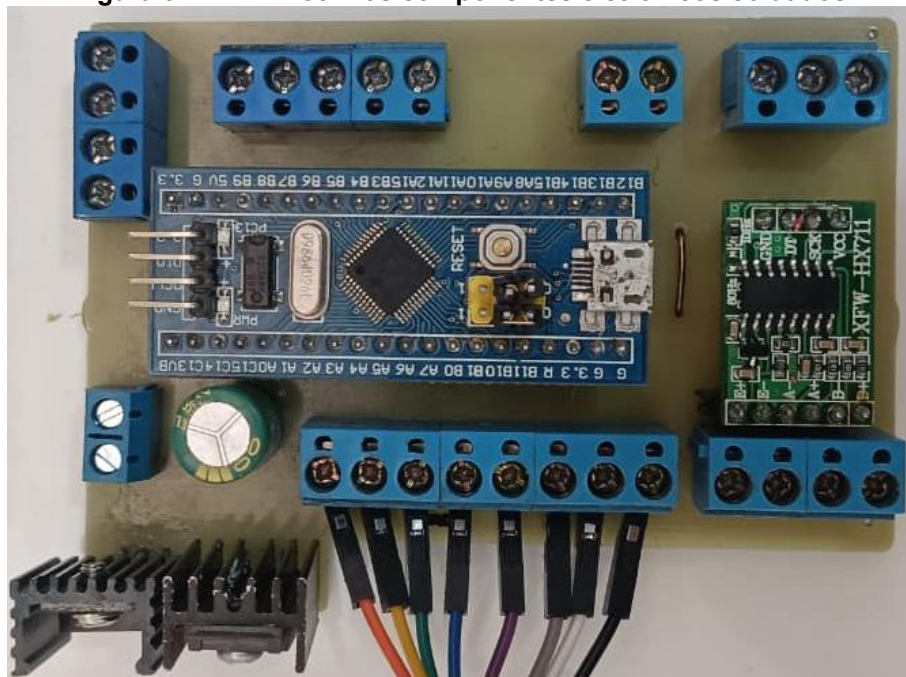
Figura 31 – PCB confeccionada na CNC



Fonte: Autoria Própria (2025)

Após a confecção da placa, procedeu-se com a soldagem de todos os componentes eletrônicos apresentada na Figura 32. Como medida de segurança e controle de qualidade, antes de alimentar o circuito, foi realizada uma inspeção minuciosa com um multímetro. Esta verificação incluiu testes de continuidade em todas as trilhas para validar as conexões e uma verificação de curto-circuito entre as linhas de alimentação (VCC e GND) e trilhas adjacentes, assegurando a integridade da montagem.

Figura 32 – PCB com os componentes eletrônicos soldados



Fonte: Autoria Própria (2025)

4.1.2 Montagem do Case e Disposição Interna

O gabinete (case) que abriga todos os componentes do protótipo foi inteiramente fabricado por impressão 3D, utilizando filamento ABS. A escolha desse material foi justificada por sua boa resistência térmica, sendo capaz de suportar as temperaturas de operação do projeto. O design foi concebido em múltiplas partes para otimizar o processo de impressão e facilitar a montagem. Para assegurar a rigidez da estrutura final, as paredes principais foram unidas e fixadas com parafusos. A ilustra Figura 33 o gabinete externo finalizado.

Figura 33 – Case externo

Fonte: Autoria Própria (2025)

Internamente, a montagem seguiu a divisão em setores que foi detalhada anteriormente na metodologia do projeto. A Figura 34 ilustra a disposição final dos componentes dentro do gabinete, onde cada módulo foi alocado em seu respectivo compartimento.

Figura 34 – Compartimento interno do Case

Fonte: Autoria Própria (2025)

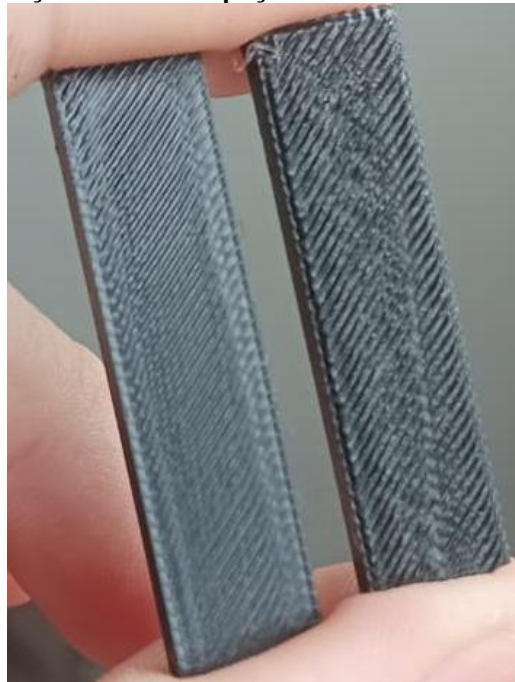
4.2 Validação da eficácia da secagem

Após construir e calibrar o protótipo, a etapa final foi provar sua eficácia. Para isso, foi preparada uma série de ensaios mecânicos seguindo as normas ASTM D638 (tração) e ISO 178 (flexão). O objetivo era quantificar o impacto da umidade e provar que o protótipo desenvolvido consegue recuperar as propriedades do material.

4.2.1 Análise Visual da Qualidade de Impressão

Antes de analisar os grupos experimentais, é crucial estabelecer uma linha de base visual para o que o trabalho define como uma impressão de qualidade *versus* uma de qualidade ruim (deformada). A Figura 35 ilustra essa diferença fundamental de forma visual próxima. A peça da esquerda (Seca) representa a impressão ideal, com linhas de extrusão uniformes e uma superfície lisa. A peça da direita (Úmida) demonstra o resultado direto da impressão com um filamento contaminado: a superfície é áspera, porosa e apresenta bolhas.

Figura 35 – Diferença visual entre peças feitas com filamento seco e úmido

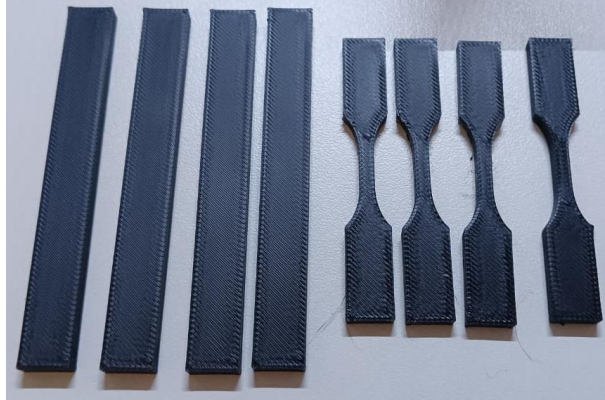


Fonte: Autoria Própria (2025)

Essa deformação ocorre porque a água aprisionada no filamento ferve instantaneamente ao entrar no bico aquecido (a ~200°C), fazendo com que o plástico "estoure" e seja extrudado de forma irregular.

Primeiramente, foram impressos os corpos de prova do grupo padrão com o filamento recém retirado do saco a vácuo e com sílica gel. Como esperado para este grupo, não ocorreu nenhum problema com a impressão dos corpos de prova como mostra a Figura 36, foram peças sem imperfeições superficiais.

Figura 36 – Corpos de prova do grupo padrão



Fonte: Aatoria Própria (2025)

Após a impressão do grupo padrão, o mesmo carretel de filamento foi umidificado por 48 horas em uma caixa térmica com um umidificador ligado, o que tornou o ambiente próximo à 100%RH, tal ambiente leva o filamento as condições mais severas de armazenamento, este é o grupo úmido. É notável que a superfície dos corpos de prova impressos com esse grupo obtiveram um aspecto diferente do grupo padrão devido a presença de umidade causando vazios internamente na peça como previa Lendvai et al., 2024. Algumas dificuldades também apareceram durante as impressões, o filamento estava um pouco quebradiço, o que demandou mais atenção ao imprimir os corpos de prova, mas que não foi suficiente para impossibilitar a impressão deles.

Figura 37 – Corpos de prova com filamento úmido por 48 horas



Fonte: Aatoria Própria (2025)

Ao término da impressão dos corpos de prova do grupo úmido, o filamento que estava umidificado foi colocado no protótipo para secar por 5 horas a 50°C. Ao final do ciclo, o próprio display do aparelho confirmou que o ambiente interno estava efetivamente seco, marcando 23 %RH, conforme registrado na Figura 38 .

Figura 38 – Umidade interna da câmara ao fim da secagem do filamento



Fonte: Aatoria Própria (2025)

Somente após a secagem, o filamento agora recuperado, foi usado para imprimir o grupo seco. A Figura 39 apresenta os corpos de prova do grupo seco feitos para o teste de tração e flexão, a qualidade superficial é visivelmente superior em relação aos corpos de prova úmidos, houve também uma melhora no momento da impressão, pois o filamento não possuía mais as características quebradiças como anteriormente.

Figura 39 – Corpos de prova do grupo seco (Seco por 5 horas a 50°C)



Fonte: Aatoria Própria (2025)

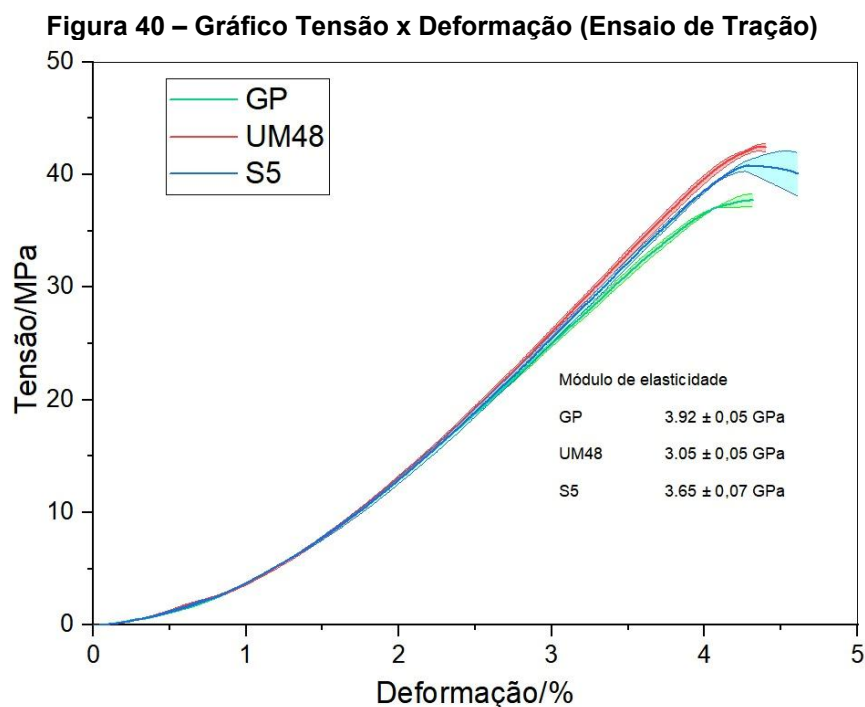
4.2.2 Análise dos Ensaio Mecânicos Quantitativos

Embora a inspeção visual da seção anterior seja um forte indicativo, a prova definitiva da eficácia do protótipo veio dos ensaios de tração (ASTM D638) e flexão (ISO 178). Conforme detalhado na metodologia, para cada um dos três grupos experimentais foram testados 4 corpos de prova para o ensaio de tração e 4 corpos de prova para o ensaio de flexão, totalizando 24 amostras.

Os gráficos e tabelas a seguir apresentam a média dos resultados obtidos para cada grupo, garantindo a credibilidade estatística da análise. Para a identificação nos gráficos, os três grupos experimentais são identificados pelas siglas:

- GP: Filamento recém retirado do saco a vácuo com sílica gel.
- UM48: Filamento úmido por 48 horas.
- S5: Filamento seco por 5 horas a 50°C

A Figura 40 apresenta a curva média de Tensão x Deformação resultante dos 4 corpos de prova de cada grupo no ensaio de tração. Este gráfico compara o desempenho mecânico, plotando a tensão em mega pascal (MPa) que o material suporta contra o percentual de deformação (alongamento) até a ruptura.



Fonte: Autoria Própria (2025)

A Tabela 2 apresenta os resultados das propriedades mecânicas obtidas para as amostras GP, UM48 e S5. Os dados compilados incluem os valores médios do módulo de elasticidade, com seus respectivos desvios padrão, bem como a tensão máxima e a porcentagem de deformação na tensão máxima observada para cada material.

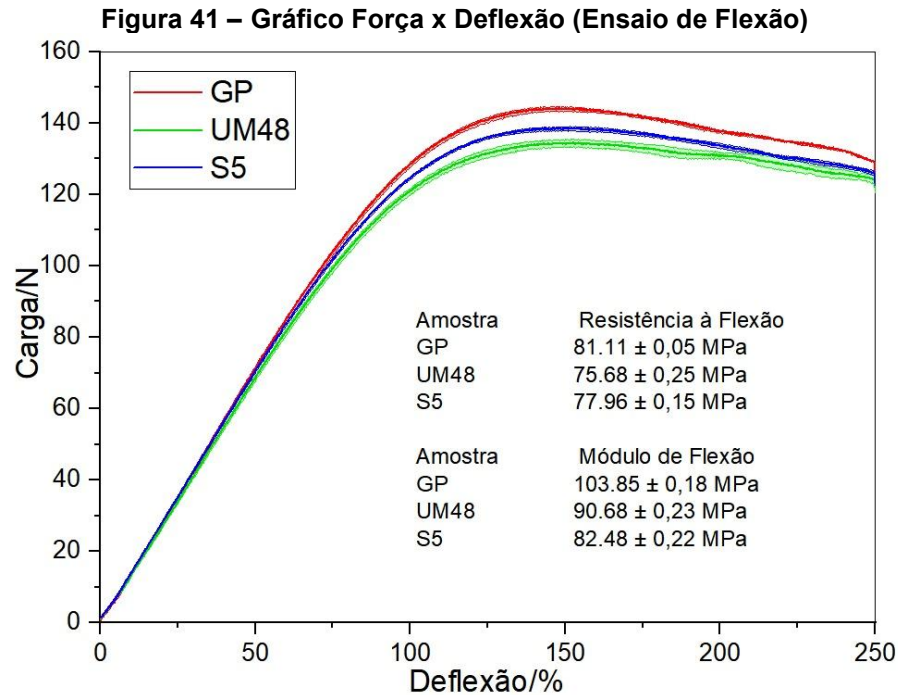
- Coluna 1: Amostra - É a identificação dos corpos de prova que foram testados (GP, UM48, S5).
- Coluna 2: Módulo de Elasticidade (GPa) - Também conhecido como módulo de Young. Ele mede a rigidez do material. Quanto maior este número, mais rígido é o material (deforma menos sob carga). Quanto menor, mais flexível ele é.
- Coluna 3: Desvio Padrão - Refere-se ao desvio do módulo de elasticidade, indica a consistência dos resultados dos testes.
- Coluna 4: Tensão Máxima (MPa) - É a resistência máxima do material. Indica a força máxima por unidade de área que o material aguentou antes de falhar ou começar a romper.

Tabela 2 – Tensão x Deformação (Ensaio de Tração)

Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Tensão Máxima (MPa)	Deformação na Tensão Máx. (%)
GP	3.92	0.05	38	4.3
UM48	3.05	0.05	42	4.3
S5	3.65	0.07	41	4.6

Fonte: Autoria Própria (2025)

De forma similar, a Figura 41 apresenta a curva média de Força x Deflexão resultante dos 4 corpos de prova de cada grupo no ensaio de flexão. Este gráfico compara a força em newtons (N) aplicada contra a deformação percentual das amostras, mostrando o quanto elas flexionam antes de falhar. As mesmas legendas (GP, UM48, S5) são utilizadas para identificar os grupos.



Fonte: Autoria Própria (2025)

A Tabela 3 compila e resume os dados numéricos médios mais importantes obtidos destes ensaios. Ela apresenta os valores de pico (Tensão máxima e força máxima), a deformação final e o módulo elástico calculado para cada um dos três grupos, estes dados são explicados a seguir:

- Coluna 1: Amostra – É a identificação dos corpos de prova que foram testados (GP, UM48, S5).
- Coluna 2: Força Máxima (N) - A Força média máxima que as amostras suportaram antes de falhar, medida em newtons (N).
- Coluna 3: Tensão de Flexão (MPa) – Medida média associada a força máxima flexora aplicada até o momento de ruptura.
- Coluna 4: Desvio Padrão da Tensão - Indica a variabilidade nos valores de tensão medidos.
- Coluna 5: Módulo Médio de Flexão - Isso representa a média da rigidez dos corpos de prova em mega pascal (MPa).
- Coluna 6: Desvio Padrão do Módulo Flexão – Erro associado as medidas realizadas para o módulo de flexão.

Tabela 3 – Força x Deflexão (Ensaio de Flexão)

Amostra	Força Média (N)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (Tensão)	Módulo Médio (MPa)	Desvio Padrão (Módulo)
GP	144.0	81.11	0.05	103.85	0.18
UM48	135.0	75.68	0.25	90.68	0.23
S5	138.0	77.96	0.15	82.48	0.22

Fonte: Autoria Própria (2025)

A análise dos dados compilados na Tabela 2, Tabela 3 e ilustrados nos gráficos (Figuras 42 e 43) revela uma conclusão crucial e consistente, demonstrando que o efeito da umidade é predominantemente o de plastificação e enfraquecimento.

Na quantificação do dano, ao comparar o grupo padrão com o grupo úmido, a exposição à umidade por 48 horas causou uma redução drástica na rigidez do material. O módulo elástico (medida da rigidez na tração) caiu de 3.92 giga pascal (GPa) para 3.05 GPa, e a resistência à flexão foi reduzida de 81.11 mega pascal (MPa) para 75.68 MPa. Essa queda na rigidez e na resistência comprova o efeito plastificante da água no polímero, tornando-o mais macio e fraco.

O processo de secagem demonstrou ser eficaz em reverter parcialmente este dano. Ao analisar o grupo seco (S5), observou-se que a rigidez foi restaurada (o módulo de tração subiu de 3.05 (GPa) para 3.65 (GPa) e a resistência à flexão melhorou (de 75.68 MPa para 77.96 MPa), comprovando que o protótipo recuperou o material.

Contudo, a comparação final entre o material seco (S5) e o material padrão (GP) mostra que o protótipo não foi capaz de restaurar o material completamente à sua condição original. O grupo padrão (GP) manteve o desempenho superior em todas as métricas de resistência e rigidez. Isso sugere que, embora o processo de secagem de 5 horas tenha sido eficaz, a exposição à umidade por 48 horas causou uma degradação estrutural permanente que não pôde ser totalmente revertida.

Esta análise final está em total acordo com o referencial teórico (Lendvai et al., 2024), que prevê uma redução do módulo devido à umidade. O protótipo de secagem provou ser essencial para reverter essa plastificação e restaurar a flexibilidade do material, uma característica vital para a impressão 3D e para a durabilidade das peças.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso alcançou integralmente o objetivo principal de desenvolver um sistema de secagem e monitoramento do filamento PLA utilizado na impressão 3D. O dispositivo foi concebido como uma solução acessível, que aborda diretamente o problema da degradação higroscópica do material e a ineficiência causada pela falta de monitoramento do filamento restante. Os objetivos específicos, que nortearam o desenvolvimento, foram plenamente atingidos e são detalhados a seguir.

O primeiro conjunto de objetivos relacionados ao desenvolvimento do *hardware* e à implementação do controle de temperatura e tempo foi concluído com sucesso. O protótipo final integrou o microcontrolador STM32F103C8T6, responsável por gerenciar a lógica do sistema, o display TFT ST7735 e o *encoder* rotativo, que compuseram a interface homem-máquina (IHM) para seleção intuitiva de parâmetros de secagem (temperatura e tempo). O controle térmico foi efetivado por meio de um algoritmo liga-desliga com histerese, que, apesar de simples, demonstrou eficácia ao manter a temperatura dentro da faixa de oscilação aceitável ao redor do *setpoint*, garantindo o ambiente ideal para a secagem do PLA.

O segundo objetivo específico, referente ao monitoramento do peso do filamento em tempo real, foi implementado por meio de uma célula de carga acoplada ao módulo HX711. Após o processo de calibração, o sistema atingiu um nível de precisão aceitável para monitoramento de consumo, apresentando um erro percentual máximo de 4,45% no menor peso testado e mantendo a estabilidade de medição. Um ponto crucial foi a implementação da tara dinâmica, que se mostrou essencial para compensar a deriva da célula de carga causada pelo aquecimento interno do dispositivo. Este recurso garante que o acompanhamento do material restante seja confiável ao longo de todo o processo de secagem e impressão.

O objetivo de validar a eficácia da secagem foi atingido por meio da análise visual e de ensaios mecânicos, que compararam o filamento em condição padrão (GP), úmida (UM48) e após a secagem no protótipo (S5). Os resultados comprovaram a necessidade do dispositivo: visualmente, o filamento úmido demonstrou defeitos de impressão, como bolhas e subextrusão. Quantitativamente, os ensaios de tração mostraram que o material úmido (UM48) sofreu uma redução de rigidez e resistência, evidenciada pela queda do módulo de tração. Após a secagem no protótipo, a rigidez

e a resistência à flexão foram restauradas de forma significativa, provando a capacidade do dispositivo de reverter a degradação causada pela absorção de umidade e recuperar a qualidade para a manufatura aditiva.

Em suma, o protótipo desenvolvido apresenta-se como uma contribuição valiosa para a área de manufatura aditiva, fornecendo uma solução eficiente para a manutenção da qualidade do filamento e para a otimização do processo de impressão 3D. Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a expansão dos testes para outros materiais higroscópicos, como ABS e PETG, e a substituição do controle Liga-Desliga por um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para reduzir a oscilação térmica e aprimorar a estabilidade da temperatura de secagem.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Alan Bica de; CARVALHO, Renon Steinbach. Análise da influência do percentual de umidade contida no filamento para os aspectos físico-mecânicos de peças fabricadas por manufatura aditivas dentro da Indústria 4.0. **In: MOSTRA NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA INTERDISCIPLINAR (MICTI)**, 16., 2023, IFC. **Anais...** Luzerna: IFC, 2023. Disponível em: <https://publicacoes.ifc.edu.br/index.php/micti/article/download/5220/4364/13981>. Acesso em: 8 nov. 2025.
- AHMAD, Yasser Asrul et al. On the Evaluation of DHT22 Temperature Sensor for IoT Application. **In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATION ENGINEERING (ICCCCE)**, 8., 2021, Gombak. **Anais...** Gombak: IEEE, 2021. p. 131-134. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352914267_On_the_Evaluation_of_DHT22_Temperature_Sensor_for_IoT_Application. Acesso em: 8 nov. 2025.
- BAZANELLA, Alexandre Sanfelice; SILVA JÚNIOR, João Manoel Gomes da. **Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto**. [S.l.]: UFRGS, 2006. Disponível em: <http://www.datadrivencontrol.com/wp-content/papercite-data/pdf/bazanella-gomesdasilva-2006.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2025.
- BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gestão, Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 3, set./dez. 2017. Disponível em: <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2025.
- BOABAID NETO, Carlos. **TRANSFERÊNCIA DE CALOR (TCL): Volume I - Parte 3**. Florianópolis: Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), 2010. Disponível em: https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/1/1a/Apostila_TCL_2010_Parte_1.pdf. Acesso em: 8 nov. 2025.
- BRIEŽNIK, Ján; ŽÁKOVÁ, Katarína; HUBA, Mikuláš. Filament dryer for FDM 3D printing. **In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL DRIVES AND POWER ELECTRONICS (EDPE)**, 2023, Bratislava. **Anais...** Bratislava: IEEE, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/374598838_Filament_dryer_for_FDM_3D_printing. Acesso em: 9 nov. 2025.
- BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, n. 2, p. 127-139, 2011. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/download/222/204>. Acesso em: 9 nov. 2025.
- BROWN, Geoffrey. **Discovering the STM32 Microcontroller**. [Indiana]: Indiana University, 2012. Disponível em: <https://biblioteca.uniscied.edu.mz/bitstream/123456789/1813/1/Discovering-STM32-Microcontroller.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2025.

CHASE, Otavio. **Sistemas embarcados**. São Paulo: SBA Jovem, 2010. Disponível em: <https://www.lyfreitas.com.br/ant/pdf/Embarcados.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2025.

COSTA, Pedro Alcantara. Desenvolvimento de uma balança de baixo custo com compensação de temperatura e interface IoT. 2023. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/5622/1/MONOGRRAFIA_DesenvolvimentoBalan%C3%A7aBaixo.pdf. Acesso em: 9 nov. 2025.

CREALITY. Filament Dry Box: Storage & Printing Filament. Creality Blog, [2024]. Disponível em: <https://store.creality.com/blogs/all/filament-fry-box-storage-printing-filament>. Acesso em: 8 nov. 2025.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; EMAMI-NAEINI, Abbas. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2013. Disponível em: <https://doceru.com/doc/neevcv55>. Acesso em: 9 nov. 2025.

GONÇALVES JÚNIOR, L. Aplicação de sistemas de pesagem na indústria de alimentos: estudo de caso. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 23, n. 1, p. 45-59, 2006.

GUTIERREZ, Regina Maria Vinhais; LEAL, Cláudio Figueiredo Coelho. Estratégias para uma indústria de circuitos integrados no Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 19, p. 3-22, mar. 2004. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2590?&locale=pt_BR. Acesso em: 9 nov. 2025.

LENDVAI, László et al. Influence of environmental humidity during filament storage on the structural and mechanical properties of material extrusion 3D-printed poly(lactic acid) parts. **Results in Engineering**, v. 24, 103013, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024012684>. Acesso em: 9 nov. 2025.

MARTE (Balanças). Balança de Precisão AD5002. [S.l.]: Marte Balanças e Aparelhos de Precisão, 2025. Disponível em: <https://www.martebalancas.com.br/produto/ad5002>. Acesso em: 8 nov. 2025.

MIYADAIRA, Alberto Noboru. **Microcontroladores PIC18: Aprenda e programe em linguagem C**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2009. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/435671554/Alberto-Noboru-Miyadaira-Microcontroladores-Pic18-Aprenda-e-Programe-Em-Linguagem-c>. Acesso em: 8 nov. 2025.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010. Disponível em: https://www.academia.edu/44607274/ENGENHARIA_DE_CONTROLE_MODERNO_5_a_EDI%C3%87%C3%83O_OGATA. Acesso em: 8 nov. 2025.

SALIH, Nahla Abdul Jalil et al. Design and implementation of a driver circuit for three-phase induction motor based on STM32F103C8T6. **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**, v. 12, n. 1, p. 42-50, fev. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/365610268_Design_and_implementation_o

[f a driver circuit for three-phase induction motor based on STM32F103C8T6](#). Acesso em: 9 nov. 2025.

SANTANA, Leonardo et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Revista Matéria**, v. 23, n. 4, e-12267, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/dpWDvBjzSXYtzbKnJdDqHVg/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 9 nov. 2025.

SILVA, Ismael Lopes. Sistemas Embarcados. Saber Eletrônica, 2020. Disponível em: <https://embarcados.com.br/blue-pill-stm32f103c8t6>. Acesso em: 3 dez. 2024.

SILVA, M. C.; OLIVEIRA, S. V. de; ARAÚJO, E. M. Propriedades mecânicas e térmicas de sistemas de PLA e PBAT/PLA. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 9, n. 2, p. 112–117, 2014. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/REMAP/article/viewFile/430/316>. Acesso em: 9 nov. 2025.

SOUSA, José Guilherme Queiroz. Efeito dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de peças impressas com filamento ABS. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/64632>. Acesso em: 9 nov. 2025.

SOUZA, Vitor Amadeu. **Display Gráfico LCD no Arduino: Programação e Aplicações**. São Paulo: Editora V. A. Souza, 2014. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=d71oEAAAQBAJ>. Acesso em: 9 nov. 2025.

STMICROELECTRONICS. **STM32F103x6, STM32F103x8, STM32F103xB: Performance line, ARM-based 32-bit MCU with Flash, USB, CAN.... Preliminary Data**. Rev 2. [S.l.]: STMicroelectronics, 2007. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2025.

WENDLING, Marcelo. **Sensores**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2010. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/898124786/Apostila-Tudo-Sobre-Sensores>. Acesso em: 9 nov. 2025.

WIDYANTO, Agus et al. Development of Filament Dryer for Drying Process of 3D Printing Filament in Open Storage Condition. [S.l.]: Universitas Negeri Yogyakarta, 2025. Disponível em: https://assets-eu.researchsquare.com/files/rs-5803806/v1_covered_b9122ce6-6e19-49ab-92ab-ab3fedc65468.pdf?c=1736731426. Acesso em: 9 nov. 2025.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. **Plásticos de engenharia: tecnologia e aplicações**. São Paulo: Artliber Editora, 2005. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/99224749/PLASTICOS-DE-ENGENHARIA-Helio-Wiebeck-Julio-Harada>. Acesso em: 9 nov. 2025.

ZHAO, Xipo et al. Strategies and techniques for improving heat resistance and mechanical performances of poly(lactic acid) (PLA) biodegradable materials. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 218, 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813022015239>. Acesso em: 9 nov. 2025.