

Construção de uma estufa *in situ* para conservação de filamentos de PLA para impressão 3D com monitoramento IoT

Thiago de Sena¹, Fábio Timbó Brito²

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Maracanaú
Departamento da Indústria –Maracanaú – CE – Brazil

thiago.sena.lima07@aluno.ifce.edu.br, fabio@ifce.edu.br

Abstract. *The PLA's quality for 3D printing can be decreased by improper humidity and temperature, accelerating its degradation through hydrolysis. In general, to eliminate this issue, commercial ovens are commonly used to keep the filament heated, removing moisture and increase its lifespan. However, these ovens are expensive and have limited storage capacity. This work proposes the development of a heating kit that can be applied locally, directly in the filament storage area, providing a flexible solution without a new drying oven. Additionally, the project incorporates an IoT-based system for real-time monitoring and control of temperature and humidity levels, using sensors for data collection and communication. This approach increases the longevity of PLA filaments and ensure better performance in 3D printing.*

Resumo. *A qualidade do filamento PLA para impressão 3D pode ser comprometida pela umidade e temperatura inadequadas, acelerando sua degradação por hidrólise. Como forma de mitigar a sua degradação, em linhas gerais, utilizam-se estufas que mantêm o filamento aquecido, retirando assim a umidade e permitindo uma maior vida útil do material. Tendo em vista o preço elevado das estufas comerciais e sua baixa capacidade de armazenamento, este trabalho desenvolve um kit de aquecimento que pode ser aplicado no próprio local (in situ) de armazenamento dos filamentos de PLA, permitindo assim o uso flexível sem a necessidade de comprar uma nova estufa. Além disso, este projeto possui como diferencial um sistema IoT para monitoramento e controle de temperatura e umidade, utilizando sensores para coleta de dados e comunicação em tempo real, permitindo controle eficiente do ambiente e preservação do material. Essa abordagem visa aumentar a vida útil do PLA e garantir melhor desempenho nas impressões 3D.*

1. Introdução

A impressão 3D é uma tecnologia inovadora que permite a fabricação de objetos tridimensionais a partir de modelos digitais, sendo amplamente utilizada em diversos setores, como educação, indústria e medicina. Segundo Santos e Andrade (2020), essa tecnologia possibilita a criação de modelos com diferentes formas e dimensões, mesmo por usuários com pouco conhecimento técnico, fomentando o pensamento *maker* e a resolução de problemas. Seu uso tem se expandido devido à capacidade de transformar ideias em protótipos funcionais de maneira acessível e personalizada. Além disso, a

impressão 3D incentiva abordagens educacionais práticas, promovendo criatividade e aprendizado ativo.

Segundo Besko, Bilyk e Sieben (2017), a tecnologia mais comum entre impressoras de baixo custo é o *Fused Deposition Modeling* (FDM), que utiliza filamentos termoplásticos aquecidos e depositados camada por camada até formar a peça final. Esse método é amplamente utilizado devido à sua acessibilidade e capacidade de produzir protótipos funcionais e peças de uso final com resistência mecânica e térmica. Além disso, segundo Campos (2022), a tecnologia FDM emprega termoplásticos de alta durabilidade, tornando-se uma opção viável para diversas aplicações industriais e educacionais.

Os filamentos de impressão 3D são materiais termoplásticos que servem como insumo para a fabricação de peças tridimensionais. Entre os diversos tipos disponíveis, o ácido polilático (PLA) se destaca como o mais utilizado na tecnologia FDM, devido à sua facilidade de uso e menor temperatura de impressão (Besko, Bilyk, Sieben 2017). O PLA é um poliéster biodegradável derivado de fontes renováveis, como amido de milho e cana-de-açúcar, tornando-o uma opção mais sustentável em comparação com outros filamentos plásticos. Apesar de sua popularidade, sua fabricação envolve um processo de extrusão complexo, onde fatores como diâmetro e fluidez do filamento são cruciais para garantir uma impressão de qualidade (Shukri et al. 2025). Além disso, o PLA é sensível à umidade e possui menor resistência térmica e mecânica do que o ABS, tornando-se inadequado para aplicações que exijam alta durabilidade ou resistência a temperaturas superiores a 60°C.

A degradação do PLA é um fator crítico a ser considerado no armazenamento de filamentos para impressão 3D, especialmente em ambientes com alta umidade. A degradação ocorre por hidrólise, na qual a presença de água leva à cisão das ligações ésteres das cadeias poliméricas, resultando na formação de ácido láctico e na alteração das propriedades do material (Watai 2018). Estudos indicam que a taxa de degradação do PLA é significativamente influenciada pela umidade e temperatura. Por exemplo, em Yao et al. (2024) demonstra-se que, em condições de umidade acima de 90% e temperaturas superiores a 50°C, a taxa de hidrólise do PLA pode ser acelerada entre 30% e 50%. Esse efeito se deve à difusão da água nas regiões amorfas do polímero, levando a um aumento na cristalinidade e posterior degradação da estrutura do material. Além disso, os grupos carboxílicos formados no processo atuam como auto catalisadores, intensificando ainda mais a degradação hidrolítica do PLA (Watai 2018). Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de um controle rigoroso das condições ambientais para minimizar a deterioração do filamento e garantir sua qualidade para impressão.

De fato, as condições ambientais como umidade absorvida pelo filamento PLA pode comprometer significativamente a qualidade das impressões, resultando em defeitos como formação de bolhas, aumento da porosidade e superfície irregular. Este efeito ocorre durante a extrusão, onde a água presente no filamento se transforma em vapor, criando vazios internos que reduzem a aderência entre camadas e enfraquecem a estrutura da peça. Além disso, a degradação química causada pela umidade torna o PLA mais quebradiço, devido a maior intensidade das ligações O-H, aumentando com isso a porosidade e diminuindo sua resistência mecânica e durabilidade (Hamid et al. 2023).

Nesse contexto, esta pesquisa propõe a construção de uma estufa no próprio local de armazenamento (*in situ*) dos filamentos de PLA, trazendo uma solução inovadora frente às soluções comerciais já encontradas no mercado. De forma a agregar um controle completo ao sistema, foi construído um monitoramento IoT com armazenamento em um banco de dados local, para controle e análise da temperatura e umidade no armazenamento de filamentos de PLA, analisando e mitigando os efeitos da degradação e prolongando a vida útil do material.

2. Metodologia e Materiais

2.1 Metodologia

Este estudo desenvolveu um sistema de aquecimento compacto que pode ser instalado *in situ*, evitando assim, a compra extra de uma estufa de aquecimento. A Figura 1 representa a metodologia empregada para a elaboração da pesquisa e detalhados na sequência.

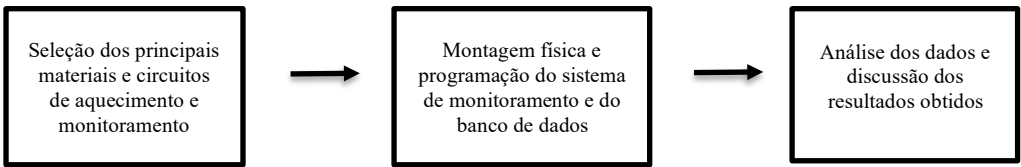


Figura 1. Metodologia da pesquisa

2.2 Ligação Física

A Figura 2. apresenta a ligação elétrica dos principais componentes do sistema.

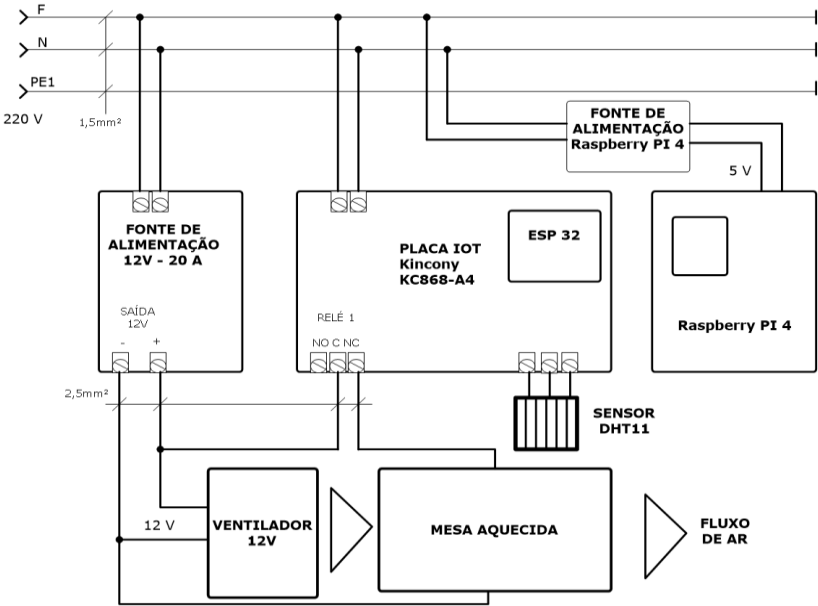


Figura 2. Ligação elétrica dos componentes. Fonte: Autoria própria (2025)

2.3 Sistema de monitoramento

A coleta de dados foi realizada por meio de um sensor de umidade e temperatura DHT11, instalado dentro do armário, responsável por medir periodicamente a temperatura e a umidade do ambiente. Essas leituras foram processadas por um microcontrolador ESP32, embarcado na placa microcontrolada IoT Kincony KC868-A4 (Kincony 2025), que se encarregou de enviar as informações à placa *Raspberry Pi 4* por meio do protocolo MQTT. Para isso, o ESP32 foi configurado para conectar-se à rede sem fio local e publicar as leituras nos tópicos MQTT apropriados.

A placa *Raspberry Pi 4* desempenhou o papel de um *broker* MQTT, utilizando o servidor gratuito *Mosquitto Broker* (Eclipse 2025) para gerenciar as mensagens publicadas pelo ESP32 e distribuí-las aos dispositivos inscritos nos tópicos correspondentes. Além disso, um programa foi desenvolvido em linguagem *Python*, executado na placa *Raspberry Pi 4* e atuando como servidor de aplicação, foi responsável por processar os dados recebidos via MQTT e armazená-los no banco de dados *MariaDB* (MariaDB 2025).

O banco de dados *MariaDB*, instalado na placa *Raspberry Pi 4*, registrou os valores de temperatura e umidade ao longo do tempo, permitindo a criação de um histórico de monitoramento para análises posteriores. A infraestrutura de comunicação do sistema é representada na Figura 3, onde é possível visualizar o fluxo de dados desde a coleta até o armazenamento e exibição em um navegador *web*.

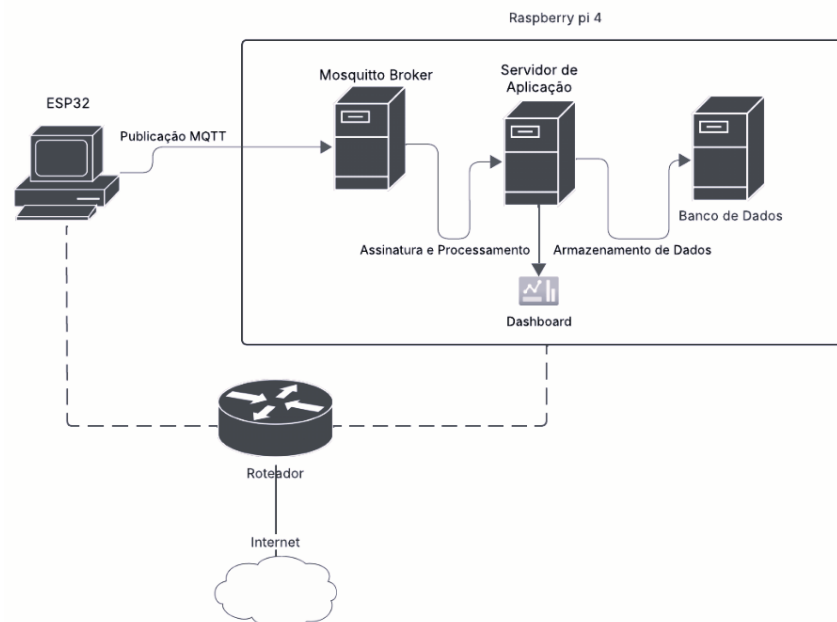


Figura 3. Diagrama da Estrutura. Fonte: Autoria própria (2025)

2.4 Armazenamento dos Dados

Para registrar os valores coletados, o *Raspberry Pi 4* executa um programa em linguagem *Python*, que escreve em tópicos do protocolo MQTT e processava as mensagens recebidas. Os dados são classificados conforme o tópico MQTT

(monitoramento/temperatura ou monitoramento/umidade) e armazenados no banco de dados *MariaDB*, instalado no próprio *Raspberry Pi 4*. Isso permitiu a criação de um histórico detalhado das condições ambientais dentro do armário de armazenamento dos filamentos de PLA.

2.5 Visualização e Análise

A análise dos dados foi realizada por meio de uma tela interativa (*dashboard*), desenvolvido com a biblioteca *Streamlit* (Snowflake 2025) em linguagem *Python*. Esse *dashboard* apresenta os valores coletados em um gráfico de linhas, permitindo a visualização da variação da temperatura e umidade ao longo do tempo. Para viabilizar o acesso remoto, foi configurado a ferramenta *Ngrok* (Ngrok Inc 2025), que expõe serviços locais para a internet por meio de um túnel de dados seguro. Essa configuração possibilitou o monitoramento em tempo real, permitindo que os dados fossem acessados de qualquer local com conexão à internet. A Figura 4 ilustra a interface do sistema, destacando o desenho do *dashboard* e os recursos de interação disponíveis para o usuário.

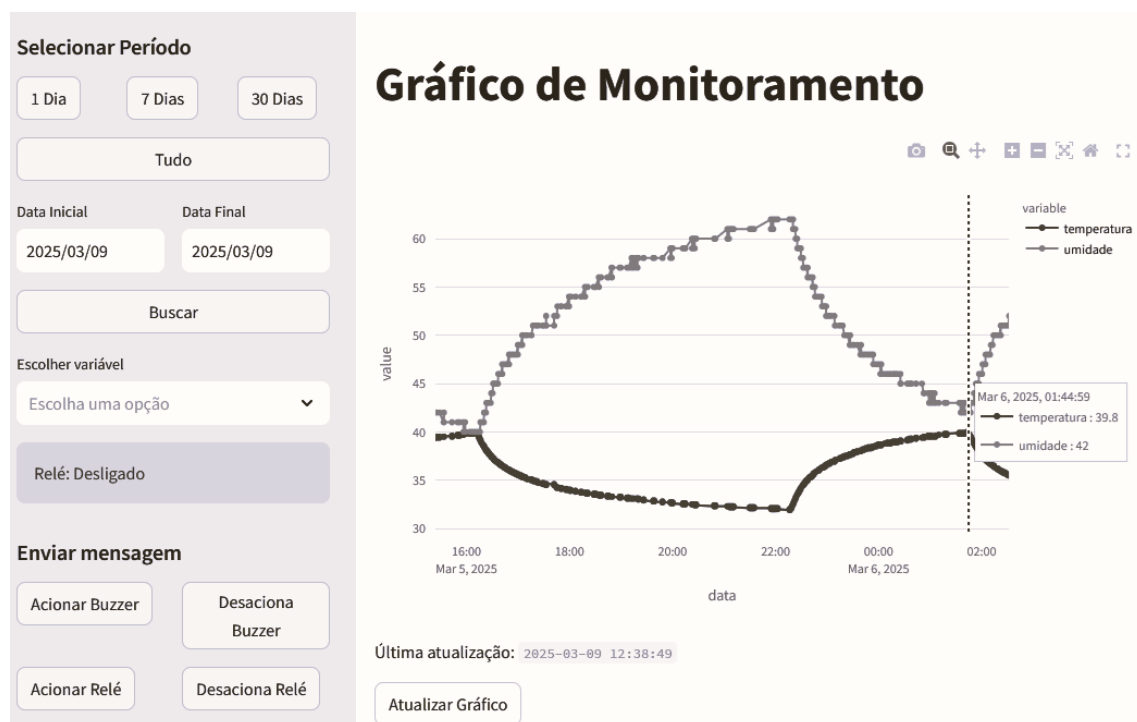


Figura 4. Tela de Aplicação. Fonte: Autoria própria (2025)

A interface do sistema disponibiliza um conjunto de recursos interativos que permitem ao usuário personalizar a exibição dos dados monitorados. Para proporcionar maior flexibilidade na análise de dados, o sistema permite ao usuário escolher qual variável deseja visualizar no gráfico. No campo "Escolher variável", é possível selecionar entre temperatura e umidade, garantindo que apenas a variável escolhida seja exibida no gráfico. Esse recurso facilita a interpretação dos dados e melhora a clareza na visualização das informações coletadas. O sistema da aplicação completa é representado pelo fluxograma da Figura 5.

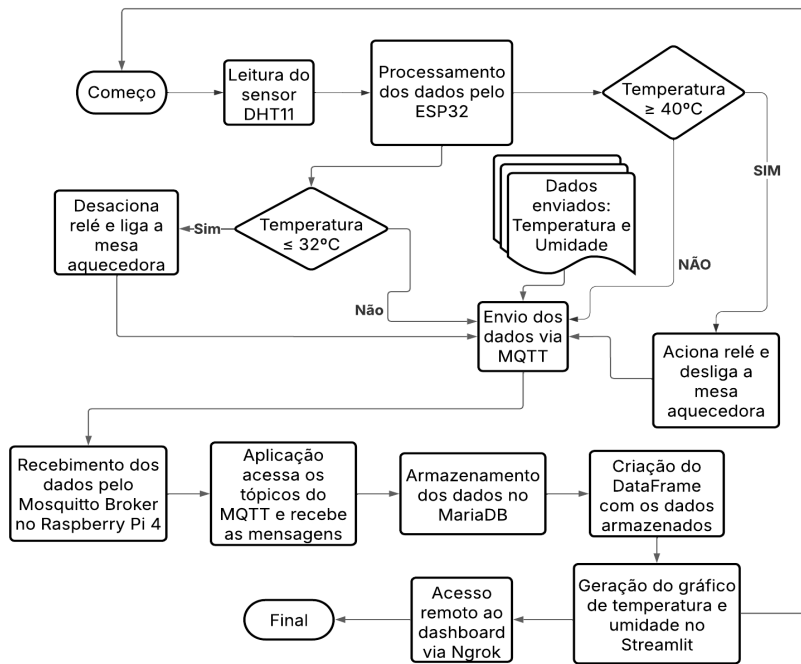


Figura 5. Fluxograma de aplicação. Fonte: Autoria Própria (2025)

3. Resultados e Discussões

3.1 Resultados do Protótipo

O circuito elétrico real da Figura 2 foi montado fisicamente de acordo com a Figura 6, onde é possível identificar na sequência da esquerda para a direita a placa IoT com sensor DHT11, o ventilador, a fonte de 12V e a mesa de aquecimento.

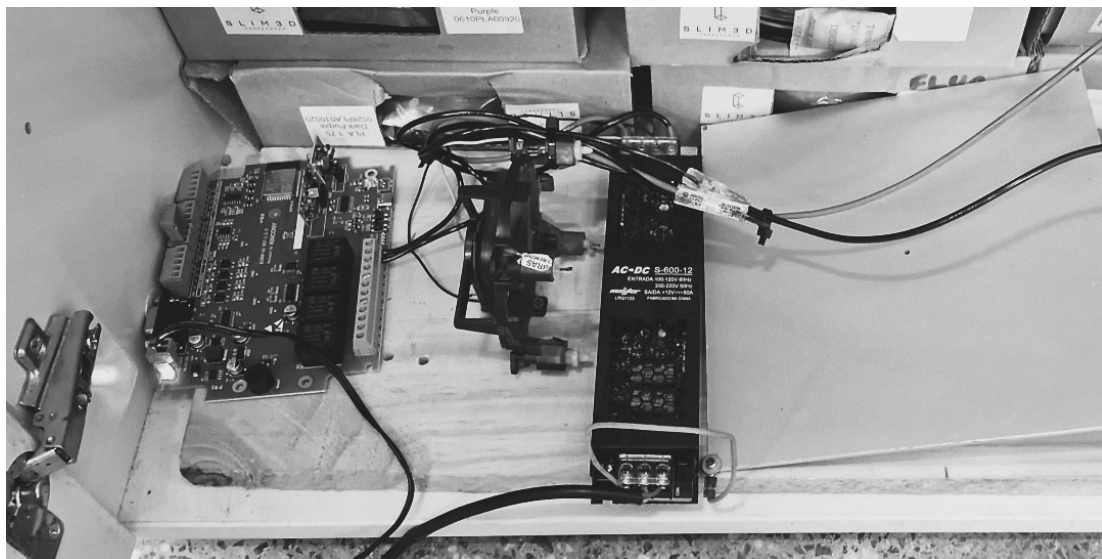


Figura 6. Componentes do projeto. Fonte: Autoria Própria (2025)

O conjunto foi apoiado em uma base de madeira para facilitar a instalação no local de armazenamento dos filamentos de PLA. Como o ar aquecido é mais leve, a localização ideal é o mais baixo possível para que ocorra a circulação de ar quente em todo o espaço interno. O armário escolhido para os ensaios do protótipo possui dimensões de 2,10 m de altura por 0,79 m de comprimento por 0,47 m de profundidade.

Para efeitos de coleta de dados para detectar a influência da temperatura no controle de umidade, *setpoint* do sistema foi ajustado para o intervalo entre 32°C e 40°C. Desta forma, quando a temperatura for maior que 40°C o relé desliga a placa de aquecimento, voltando a ligar quando a temperatura for menor que 32 °C. O gráfico da Figura 7 representa o comportamento dinâmico da temperatura dentro do armário antes do aquecimento ser ligado. Observa-se que a umidade relativa está em torno de 62% e a temperatura 32,6°C.

Gráfico de Monitoramento

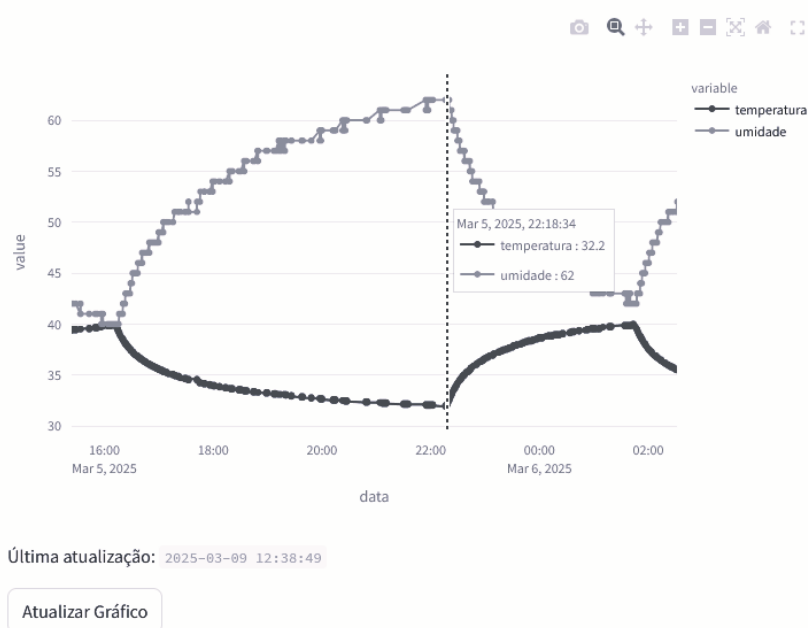


Figura 7. Valores de temperatura e umidade relativa sem o aquecimento
Fonte: Autoria Própria (2025)

Na comparação da Figura 7 com a Figura 4, observa-se que após ligado o aquecimento a umidade relativa diminuiu para 42% e a temperatura aumentou para 40°C em um tempo médio de 3,5 horas. Considerando que a potência da placa é de cerca de 120W, pode-se calcular o gasto total de energia equivalente a 420 Wh.

3.2 Avaliação do Sistema

A implementação do sistema de monitoramento e controle de temperatura e umidade para a estufa de armazenamento de filamentos PLA demonstrou resultados satisfatórios na preservação da integridade do material. O uso do ESP32 com o sensor DHT11 permitiu a aquisição contínua dos dados ambientais, garantindo um controle dinâmico da temperatura através do acionamento automático da placa de aquecimento. O ajuste do *setpoint* para 40°C mostrou-se eficiente na manutenção de um ambiente seco, reduzindo significativamente a umidade relativa do ar de aproximadamente 62% para 42%, como apresentado nos gráficos das Figura 7 e Figura 4 respectivamente.

Na comparação entre filamentos armazenados na estufa controlada e em um ambiente sem controle térmico, evidenciou-se a importância do sistema desenvolvido, ou seja, no armário sem controle, o PLA apresentou fragilidade estrutural e sinais evidentes de degradação por hidrólise, tornando o material quebradiço. Em contrapartida, o filamento mantido no armário com o conjunto de aquecimento desta pesquisa preservou suas propriedades originais, garantindo com isso a qualidade para impressão 3D.

Além dos benefícios observados na preservação do material, o sistema mostrou-se energeticamente eficiente, pois o acionamento da placa de aquecimento ocorre apenas quando a temperatura atinge valores abaixo do limite definido. Isso reduz o consumo desnecessário de energia, tornando a solução viável para uso contínuo.

Dessa forma, a solução proposta se apresenta como uma alternativa prática e acessível para o armazenamento adequado de filamentos de PLA, mitigando os efeitos adversos da umidade e prolongando a vida útil deste material. O monitoramento em tempo real dos parâmetros ambientais e o acionamento automatizado do controle térmico garantem um ambiente ideal para a conservação do PLA, destacando a importância do desenvolvimento de soluções personalizadas para o aprimoramento da impressão 3D.

4. Conclusões e recomendações

A Tabela 1 abaixo mostra os dados técnicos de uma estufa com capacidade similar no mercado.

Tabela 1. Detalhes técnicos de estufa comercial similar

Capacidade (kg)	Preço (R\$)	Dimensões (cm)	Faixa de temperatura (°C)	Potência (W)
24	2320	60x55x47	Até 71	180

A Tabela 2 mostra os valores gastos para montar o protótipo do *kit* básico, deste projeto capaz de armazenar 24 filamentos de 1kg de acordo com o armário de teste utilizado.

Tabela 2. Amostra de preços componentes para montagem do protótipo

Componente	Preço (R\$) (março de 2025)
Fonte de 12 V	22,99
Ventilador	5,99
Placa Kincony KC868-A4	221,18
Sensor DHT11	8,45
<i>Raspberry</i> PI 4 (4gb)	490
Total	748,61

De acordo com a análise de preço e avaliação do sistema pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Considerando o preço da estufa similar de referência que armazena 24 filamentos, pode-se concluir que o sistema oferece uma vantagem de preço de R\$ 1.500,00, considerando ainda o sistema de monitoramento com diferencial;
- Foi evidenciado que o sistema de aquecimento forneceu uma queda de umidade superior a 20%, valor que pode variar de acordo com a quantidade de filamentos presentes no armário;
- Considerando o gasto de energia com o *setpoint* de 40° C e o tempo de 6 horas para reiniciar o ciclo de acordo com o gráfico da Figura 10, pode-se considerar o consumo de apenas 36% da potência total de 120W ao longo do tempo. Ao passo que, num teste com aumento de *setpoint* para 50°C, observou-se que a placa de aquecimento fica integralmente ligada com 100% da potência da placa;
- Em ensaios em um armário de comparação sem o sistema de aquecimento foi possível comparar o efeito final na qualidade dos filamentos, evidenciando que o mesmo não ficou quebradiço devido a hidrólise do PLA.

Durante o desenvolvimento da pesquisa sugere-se algumas recomendações caso sejam realizados trabalhos similares no futuro:

- Reforçar as saídas de ar para evitar perda de energia devido à fuga de ar quente passar por frestas das portas do armário;
- Dimensionar mais placas de aquecimentos caso sejam necessários atingir patamares maiores de temperatura no que tange ao armazenamento dos filamentos de PLA.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem o apoio desta pesquisa ao laboratório Espaço Maker do IFCE campus Maracanaú e ao Departamento de Extensão, Pesquisa, Pós Graduação e Inovação (DEPPI) do campus Maracanaú pelo incentivo à pesquisa científica através de bolsas de IC.

Referências

- Besko, M., Bilyk, C. Sieben, Priscila G. (2017). “Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D”, In: Gestão, Tecnologia e Inovação: Revista eletrônica dos Cursos de Engenharia. v. 1, n. 3, Curitiba, p. 1-10.
- Campos, L., Victor D. (2022) “Avaliação do efeito do nível e do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por impressão 3d utilizando o material abs” In: TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Russas.

- Eclipse Foudation (2025) “An open source MQTT broker”, <https://mosquitto.org/>, Acesso em: 10 mar. 2025.
- Hamid, R.A., Sindam, D.,Akmal ,S., Abdullah, L., Ito, T. (2023) “Impact of humidity on chemical bonding, porosity and microstructure of 3d printed pla. In: Journal of Advanced Manufacturing Tecnology (JAMT), v. 17, n. 3, p. 29-40.
- Kincony Inc. (2025) “KC868-A4 hardware design details” <https://www.kincony.com/kc868-a4-hardware-design-details.html>, Acesso em: 10 mar. 2025.
- MariaDB Foundation. MariaDB Server (2025) “The innovative open source database”, <https://mariadb.org/>, Acesso em: 10 mar. 2025.
- Ngrok Inc. (2025). “Putting your APIs online shouldn't be hard”, <https://ngrok.com/>, Acesso em: 10 mar. 2025.
- Santos, J. T., Andrade, Adja F. (2020) “Impressão 3D como Recurso para o Desenvolvimento de Material Didático: Associando a Cultura Maker à Resolução de Problemas”,In: Revista Novas Tecnologias na Educação, Rio Grande do Norte, v. 1, n. 18, p. 1-11.
- Snowflake Inc. (2025) “A faster way to build and share data apps”, <http://streamlit.io>, Acesso em: 10 mar. 2025.
- Shukri, A. Y. M., Abdullah, A. M., Shuib, S., Mohamad, D. (2025) “Preparation and Characterization of PLA Filaments for FDM 3D Printing”, In: Journal of Mechanical Engineering. Selangor, v.22, p. 223-232.
- Yao, X., Yang, X., Lu, Y., Qiu, Y., Zeng, Q. (2025) “Review of the Synthesis and Degradation Mechanisms of Some Biodegradable Polymers in Natural Environments” In: Polymers,17,66 p. 1-21.
- Watai, J. S. (2018) “Degradação hidrolítica do poli (ácido láctico) (PLA) e de compostos de pla/nano-hidroxiapatita. In: Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica Com Ênfase em Materiais e Processos., Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo.