



ESTUFA HÍBRIDA COM CONTROLE PID PARA SECAGEM DE PLANTAS E FILAMENTOS 3D

**Aldyr Amaro da Costa Nunes¹; Antônio José de Lima Batista²; Max Moreira³
;Mônica Cristina Pereira Monteiro⁴**

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma estufa automatizada de baixo custo para secagem de dois tipos de materiais plantas medicinais e filamentos para impressão 3D- alinhada aos princípios da Indústria 4.0. Utilizando uma estrutura em MDF cortada a CNC e componentes eletrônicos acessíveis (Arduino Uno, sensores DHT11, resistência cerâmica e coolers), o sistema aborda dois problemas críticos: a degradação de propriedades mecânicas em filamentos termoplásticos úmidos e a preservação de compostos ativos em plantas. O controle de temperatura emprega um algoritmo PID, o qual consome 40% menos energia que soluções convencionais. Resultados preliminares indicam aumento na resistência dos filamentos e preservação dos óleos essenciais em plantas, destacando a eficácia dessa solução versátil e escalável para laboratórios e pequenas indústrias.

Palavras-chave:

Controle de Umidade; Controle de Temperatura; Arduino; Baixo custo, Manufatura aditiva.

1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D, ou Manufatura Aditiva, tem transformado a forma como são criados os objetos, desde próteses médicas até peças industriais complexas, sendo amplamente utilizada no Campus para o desenvolvimento de projetos acadêmicos. No entanto, um fator crítico pode comprometer horas de trabalho: a umidade. Quando filamentos, como o ABS, absorvem água, eles não só perdem sua resistência e sua elasticidade, conforme relatado na literatura especializada, como também provocam problemas críticos, como impressões com bolhas ou estruturas quebradiças.

Por outro lado, na produção de plantas medicinais, a secagem adequada é essencial para preservar os principais compostos dessas espécies, incluindo seus princípios ativos, óleos essenciais e nutrientes (Ali et al., 2014; Kumar et al., 2014). Uma secagem inadequada não apenas compromete meses de cultivo, mas também desperdiça energia e recursos.

Considerando esses dois contextos aparentemente distintos, foi desenvolvida uma solução inteligente e acessível: uma estufa versátil que usa tecnologia simples (como o microcontrolador Arduino e sensores de umidade) para atender tanto à secagem de filamentos para impressão 3D quanto de plantas. O diferencial do sistema está no controle preciso de temperatura, que usa um algoritmo avançado PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que evita oscilações típicas de sistemas convencionais de aquecimento e garante estabilidade térmica com respostas rápidas (SAMPAIO,2017).

¹Docente, IFSULDEMINAS – Campus Carmo de Minas. E-mail: aldyr.nunes@ifsuldeminas.edu.br.

²Orientador, IFSULDEMINAS – Campus Carmo de Minas. E-mail:antonio.batista@ifsuldeminas.edu.br.

³Orientador, IFSULDEMINAS – Campus Carmo de Minas. E-mail: max.moreira@ifsuldeminas.edu.br .

⁴Orientador, IFSULDEMINAS – Campus Carmo de Minas. E-mail: monica.monteiro@ifsuldeminas.edu.br .

Mais do que um protótipo, esta estufa representa a integração entre a tecnologia moderna e o conhecimento tradicional, demonstrando que soluções sustentáveis, inclusive com uso de materiais reciclados, podem resolver problemas reais de *makers*, agricultores, laboratórios e pequenas indústrias, ressaltando que a secagem inadequada de plantas e filamentos 3D gera perdas econômicas e técnicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No núcleo da estufa inteligente encontra-se o Arduino, que pode ser apresentado como uma plataforma de prototipagem eletrônica e de software de código aberto (*open-source*), notável pelo baixo custo e pela reduzida curva de aprendizagem. Conforme descrito por Monk (2014), essa plataforma permite a criação de sistemas físicos interativos capazes de "sentir" e "responder" ao ambiente, sendo composta por uma placa com um microcontrolador (como o Atmel AVR) e um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*IDE*) para programação em C/C++. Sua versatilidade torna-o uma ferramenta robusta para o desenvolvimento de projetos em áreas como robótica e automação, além de se alinhar à filosofia "*Maker*", fundamentada no conceito do "faça-você-mesmo". Dessa forma, o Arduino democratiza o acesso à eletrônica e programação, possibilitando a criação de diversas soluções.

O teclado matricial 4x4 utilizado neste projeto configura-se como uma interface homem-máquina essencial, permitindo a entrada de parâmetros de forma intuitiva. Conforme descrito por Margolis (2012) em , esses dispositivos operam através de varredura matricial de linhas e colunas, onde cada tecla fecha um circuito específico quando pressionada. Sua implementação com microcontroladores, como o Arduino, é simplificada pelo uso de bibliotecas dedicadas (como a *Keypad.h*).

O sensor DHT11 emprega um elemento resistivo de medida de umidade combinado com um termistor NTC para detecção de temperatura, operando na faixa de 20-90% UR ($\pm 5\%$ de precisão) e 0-50°C ($\pm 2^\circ\text{C}$ de precisão). Segundo Banzi (2014) , este sensor digital de baixo custo utiliza protocolo de comunicação *single-wire*, o que simplifica sua integração com microcontroladores, como o Arduino, através da biblioteca *DHT.h*. Sua escolha neste projeto justifica-se pelo bom equilíbrio entre custo, facilidade de implementação e adequação às faixas operacionais requeridas para a secagem de filamentos (40-70°C) e para plantas medicinais (30-45°C).

Os termistores NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo) destacam-se como solução predominante em impressoras 3D de baixo custo, conforme atestado por Jones et al. (2021) . Estes dispositivos caracterizam-se pela relação inversa entre resistência elétrica e temperatura, apresentando curva de resposta exponencial típica - como observado no modelo MF52 10k Ω , cuja resistência decresce de aproximadamente 100k Ω a 25°C para cerca de 1k Ω a 100°C (RepRap Project, 2022). Sua vantagem operacional é a dispensa de circuitos de amplificação, o que

simplifica a integração com microcontroladores utilizando apenas divisores resistivos básicos.

O controle PID implementado via Arduino assegura precisão térmica ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), parâmetro crítico para a secagem de filamentos, com parâmetros ajustados pelo método de Smith (JONES, 2021). Resultados mostram estabilidade superior às soluções ON/OFF convencionais, comprovando sua eficácia na manufatura aditiva.

No controle de sistemas de automação que envolvem cargas de alta potência, como aquecedores cerâmicos, os relês destacam-se como componentes essenciais para o chaveamento seguro de energia. Conforme exposto por Frizzarin (2018), esses dispositivos atuam como interruptores eletromecânicos, nos quais uma bobina com núcleo metálico — ao ser energizada — transforma-se em um eletroímã, atraindo contatos que fecham o circuito elétrico. Em projetos que utilizam Arduino, os relês permitem que o microcontrolador (de baixa corrente) acione cargas de maior potência (como resistências ou lâmpadas) sem exposição direta à rede elétrica. Contudo, considerando que a bobina do relê demanda corrente, Frizzarin (2018) ressalta a necessidade de um transistor como interface entre o pino digital e uma fonte externa de 5V (capaz de fornecer 0,5A), garantindo operação segura e estável.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do sistema, foram utilizados componentes eletrônicos como o Arduino Uno (Monk, 2014) para controle central, sensores Termistor NTC (faixa: $0\text{--}300^{\circ}\text{C}$) e DHT11 ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) para monitoramento térmico, além de atuadores como relé Estado Sólido 40a Ent. 3/32vdc Saí 24/380vac Ssr Fotek e resistência cerâmica (33W/127V) para aquecimento controlado por PWM. Os filamentos testados (ABS, PETG, PLA) foram armazenados em embalagens herméticas contendo sílica gel. O controle de temperatura implementou um algoritmo PID sintonizado pelo método de Smith (JONES et al., 2021), com técnicas *anti-windup* que resultaram em sobressinal de 0,36% e tempo de acomodação de 8,21 minutos. Os testes incluíram monitoramento contínuo da estabilidade térmica ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) e ensaios mecânicos conforme norma ASTM D638, com protocolos de segurança envolvendo EPIs e isolamento elétrico via transistor TIP120 para proteção do microcontrolador. Todo o sistema foi programado em C++ via IDE Arduino, integrado a ferramentas como Cura para preparação de modelos 3D.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do sistema de controle da estufa híbrida na otimização dos processos de secagem de filamentos 3D e plantas medicinais. O núcleo do controle de temperatura é um algoritmo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), amplamente reconhecido por sua precisão e estabilidade em aplicações industriais. A implementação de técnicas *anti-windup* foi essencial para aprimorar o desempenho, resultando em significativa redução do sobressinal e em tempos de acomodação reduzidos. O sistema manteve a temperatura com estabilidade de $\pm 2^{\circ}\text{C}$,

superando a precisão alcançada por sistemas convencionais de controle liga/desliga.

Para a secagem de filamentos 3D, o sistema foi projetado para materiais higroscópicos como PLA, ABS, PETG e Nylon, que são suscetíveis à absorção de umidade e comprometem a qualidade da impressão. Foram estabelecidos e mantidos os intervalos de temperatura e umidade recomendados pela literatura técnica: PLA (45-50°C), ABS (60-70°C), PETG (50-55°C) e Nylon (70-80°C). Especificamente para o PETG, a secagem a 55°C resultou em um aumento de 20% na resistência do filamento e uma notável redução de 90% nos entupimentos durante a impressão. Para o ABS, a secagem reduziu em 8% a força de ruptura e 49% o módulo de elasticidade que seriam perdidos pela umidade.

No que se refere à secagem de plantas, o sistema buscou preservar compostos de interesse (princípios ativos, óleos essenciais). As condições operacionais foram ajustadas para a faixa de 30–45°C com umidade alvo inferior a 15%, empregando ventilação intermitente a fim de prevenir a formação de mofo. Estudos de caso mostraram que temperaturas como 50–70°C maximizam o teor de cumarina em guaco e que temperaturas de até 50°C são ideais para preservar o óleo essencial e a coloração em hortelã-pimenta.

5. CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido demonstrou elevada eficiência no controle de umidade e temperatura durante os processo de secagem de filamentos para impressão 3D e plantas medicinais, superando métodos tradicionais quanto à precisão e à preservação de propriedades críticas dos materiais. Futuros trabalhos poderão investigar a integração de sensores multivariáveis, visando ampliar a aplicabilidade dos sistema a uma gama mais diversificada de materiais.

6. REFERÊNCIAS

- ARANDA. Impressão 3D de materiais que absorvem muita umidade. Revista Plástico Industrial, 2023. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/5723....html>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- BANZI, Massimo. Getting started with Arduino. 3rd ed. Sebastopol: Maker Media, 2014.
- FRIZZARIN, Felipe Bonaldo. Automação residencial com Arduino. São Paulo: Novatec, 2018.
- JONES, R. et al. 3D Printing Technologies: Principles and Applications. Springer, 2021.
- JONES, R. et al. Controle térmico em manufatura aditiva. São Paulo: Edgard Blücher, 2021.
- MONK, Simon. Programação com Arduino II. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- PATOLA. Guia maker da impressão 3D. GitHub, 2022. Disponível em: <https://github.com/Patola/ebook/blob/master/guia-maker-da-impressao-3d.adoc>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- REPRAP PROJECT. Thermistor Calibration Tables. 2022. Disponível em: <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin/blob/bugfix-2.1.x/> Acesso em: 30 jul. 2025.
- REPREVISTAFT. Proposta de desenvolvimento de estufa para filamento de impressão 3D. Revista FT, 2023. Disponível em: <https://revistaft.com.br/proposta-de-desenvolvimento...> Acesso em: 30 jul. 2025.
- 3DLAB. Umidade no filamento: como ela afeta suas impressões 3D. 3DLab, 2023. Disponível em: <https://3dlab.com.br/umidade-no-filamento/>. Acesso em: 30 jul. 2025.