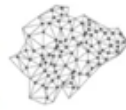




III MCSM

Modelagem Computacional no
Sertão Mineiro



PPGMCS
Programa de Pós-Graduação em
Modelagem Computacional e Sistemas

**PROPOSTA DE ARQUITETURA COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL
EMBARCADA PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DE COMPOSTAGEM
TERMOFÍLICA DE CASCAS DE PEQUI (*Caryocar brasiliense*)**

Ricardo Pereira C. Santos¹ - januariaricardo@gmail.com

Anderson Simões Lacerda¹ - aslacerda@gmail.com

Luiz Fayme Soares Pereira¹ - luiz.fayme.adm@gmail.com

Wellen Quézia Bernardes Durães^{1,2} - queziabernardes@gmail.com

Fernanda Simões Lacerda³ - nandasimoes22@hotmail.com

¹Mestrando em Modelagem Computacional e Sistemas – Unimontes.

²Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM

³Mestrado em Biotecnologia e Recursos Genéticos – Unimontes.

Abstract. *Este trabalho propõe uma arquitetura de sistema ciberfísico (CPS) para monitoramento multiparamétrico e controle autônomo da compostagem termofílica de cascas de pequi (*Caryocar brasiliense*). A solução baseia-se em um ESP32 acoplado a um conversor ADS1115 para maior precisão metrológica, integrado a sensores de temperatura, umidade e gases (O_2 , CH_4 , NH_3 , CO_2). A estratégia de controle emprega um modelo de aprendizado de máquina XGBoost, que classifica o estado do biossistema, integrado a uma máquina de estados finitos (FSM) em malha fechada para acionamento de atuadores (revolvimento, irrigação e ventilação). A arquitetura opera em Edge Computing, sendo ideal para regiões sem conectividade, como a agricultura familiar. De caráter propositivo, o estudo estabelece as bases tecnológicas para futuros protótipos experimentais, visando a gestão sustentável de resíduos agroindustriais e o cumprimento do ODS 12 (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - Consumo e produção responsáveis).*

Keywords: *Inteligência artificial embarcada, Compostagem termofílica, *Caryocar brasiliense*, Edge computing, Sistemas ciberfísicos*

1. INTRODUÇÃO

O pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess.) possui elevada relevância para as comunidades do Norte de Minas Gerais, sendo amplamente explorado pela agroindústria regional (SILVA et al., 2020). Porém, seu processamento gera grande quantidade de resíduos sólidos (cascas) com alta recalcitrância biológica devido à lignina e fibra (SOUZA et al., 2018). O descarte inadequado

causa sérios impactos ambientais. A compostagem aeróbia termofílica apresenta-se como uma solução técnica viável para valorizar esse resíduo (MASON; MILKE, 2005) e obter um produto final adequado às especificações de fertilizantes orgânicos (BRASIL, 2009).

Contudo, sua eficiência depende do controle rigoroso de temperatura, umidade e oxigenação, sendo que em pequenas propriedades rurais esse monitoramento costuma ser empírico, dificultando a padronização.

Para suprir essa lacuna, os avanços em Sistemas Ciberfísicos (CPS), *Edge Computing* e Inteligência Artificial (IA) embarcada permitem automatizar processos biológicos sem dependência de comunicação constante. Assim, este trabalho propõe uma arquitetura de CPS para monitoramento multiparamétrico e controle autônomo da compostagem termofílica de cascas de pequi. De caráter conceitual, o estudo estabelece as bases tecnológicas para futuros protótipos experimentais, visando soluções de agricultura inteligente alinhadas ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cinética e indicadores gasosos do processo

A compostagem é um processo dinâmico no qual microrganismos estabilizam a matéria orgânica. Para fins de modelagem computacional, a taxa de degradação do substrato pode ser aproximada pelo modelo de Monod, com um fator de correção térmica (HAMELERS, 2001):

$$r_s = \mu_{max} \cdot f(T) \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \right) \cdot \left(\frac{S}{K_s + S} \right) \cdot X \quad (1)$$

onde μ_{max} é a taxa de crescimento microbiano, $f(T)$ o fator térmico, C_{O_2} e S as concentrações de oxigênio e substrato, K_{O_2} e K_s as constantes de meia saturação, e X a biomassa ativa. Como a casca de pequi prolonga a fase termofílica, a manutenção rigorosa das variáveis físicas é essencial.

Além da temperatura, o monitoramento gasoso (O_2 , CO_2 , CH_4 , NH_3) indica de forma mais abrangente o estado metabólico. A redução do O_2 acusa o início da formação de zonas anaeróbias antes mesmo do aumento de CH_4 . O uso conjunto desses parâmetros fornece um conjunto robusto de atributos para algoritmos de classificação operacionais.

O dióxido de carbono (CO_2) é produzido predominantemente durante a respiração aeróbia e sua emissão tende a acompanhar a intensidade da atividade microbiológica. Já o metano (CH_4) está associado à instalação de regiões anaeróbias no interior da pilha, funcionando como um indicador de falha na aeração. A amônia (NH_3), por sua vez, relaciona-se aos processos de mineralização do nitrogênio e pode indicar desequilíbrios na relação carbono/nitrogênio ou temperaturas excessivamente elevadas. (BECK-FRIIS et al., 2001).

Do ponto de vista metodológico, o O_2 é a variável mais diretamente vinculada ao controle preventivo da compostagem aeróbia, enquanto CH_4 , NH_3 e CO_2 atuam como variáveis complementares de diagnóstico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Arquitetura do sistema proposta

A arquitetura utiliza o microcontrolador ESP32-WROOM-32 devido à sua capacidade de processamento e conectividade. Adicionalmente, prevê-se a integração com uma interface local para visualização intuitiva das variáveis e estados operacionais pelo produtor rural, respeitando boas práticas de design de informação (FEW, 2013). Para garantir precisão metrológica e contornar limitações do ADC interno (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022), propõe-se um conversor analógico-digital externo ADS1115 (16 bits).

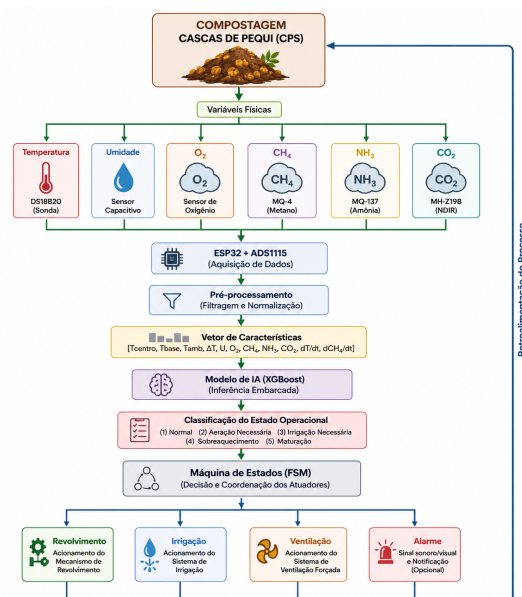


Figure 1: Arquitetura proposta do Sistema Ciberfísico para monitoramento e controle da compostagem termofílica de cascas de pequi

O conjunto de instrumentação, detalhado na Tabela 1, inclui sensores ambientais e de gases, com destaque para um sensor eletroquímico de O_2 e um NDIR (MH-Z19B) para CO_2 , superior em seletividade aos semicondutores comuns. A atuação ocorre via sistemas de revolvimento, irrigação e ventilação.

Table 1: Sensores previstos para a arquitetura proposta.

Grandeza	Sensor	Interface
Temperatura da pilha	DS18B20	1-Wire
Temperatura ambiente	DHT22	Digital
Umidade	Capacitivo	ADS1115
Oxigênio (O_2)	Eletroquímico	ADS1115
Metano (CH_4)	MQ-4	ADS1115
Amônia (NH_3)	MQ-137	ADS1115
Dióxido de Carbono (CO_2)	MH-Z19B	UART

3.2 Modelagem computacional e estratégia de controle

Como base para a tomada de decisão, o estado operacional é modelado pelo vetor $V(t)$, combinando leituras instantâneas e derivadas temporais:

$$V(t) = \left[T_{centro}, T_{base}, T_{amb}, \Delta T, U, O_2, CO_2, CH_4, NH_3, \frac{dT}{dt}, \frac{dCO_2}{dt} \right] \quad (2)$$

Propõe-se um modelo de *Machine Learning* baseado em *XGBoost*, executado localmente via *Edge Computing*, para classificar o sistema em cinco estados fundamentais: NORMAL, AERAÇÃO NECESSÁRIA, IRRIGAÇÃO NECESSÁRIA, SOBREAQUECIMENTO e MATURAÇÃO.

A resposta do sistema baseia-se em uma Máquina de Estados Finitos (FSM) que orquestra os atuadores em malha fechada, empregando *debouncing* temporal para evitar oscilações repetitivas no hardware e permitindo que o processo biológico estabilize entre as intervenções. A execução de modelos de IA diretamente no microcontrolador reduz a latência e a dependência de comunicação externa, alinhando-se aos conceitos de TinyML e computação em névoa/borda (BANERJEE; CHOUDHARY, 2021).

4. RESULTADOS ESPERADOS E DISCUSSÃO

A proposta supera abordagens tradicionais baseadas unicamente na temperatura ao integrar a dinâmica dos gases (O_2 , CH_4 , CO_2 , NH_3) na tomada de decisão. Ao processar o vetor de dados por meio de *Edge Computing* no próprio ESP32, garante-se autonomia e robustez em propriedades rurais desprovidas de conectividade em nuvem (ANATEL, 2023). Adicionalmente, a FSM isola a lógica de acionamento do algoritmo de IA, facilitando ajustes futuros.

As limitações desta fase conceitual residem na dependência física da calibração (especialmente dos sensores MQ, sensíveis a oscilações climáticas) e na necessidade de dados de campo para o treinamento do *XGBoost*. A pesquisa direciona-se, portanto, à instrumentação física e posterior análise de métricas como F1-score e tempo total de estabilização da matéria.

5. LIMITAÇÕES DO TRABALHO E PERSPECTIVAS FUTURAS

O presente trabalho possui caráter conceitual e propõe uma arquitetura computacional para monitoramento inteligente e controle da compostagem termofílica de cascas de pequi, não contemplando, nesta etapa da pesquisa, a implementação física do sistema nem sua validação experimental. Dessa forma, as decisões arquiteturais, os parâmetros operacionais e a estratégia de controle apresentados constituem uma base metodológica para o desenvolvimento das etapas subsequentes do projeto.

Embora a arquitetura tenha sido concebida com base em fundamentos consolidados de Sistemas Embarcados, Internet das Coisas, Sistemas Ciberfísicos e Aprendizado de Máquina, o desempenho efetivo do sistema dependerá da obtenção de dados experimentais representativos, da calibração dos sensores empregados e da validação dos modelos computacionais em condições reais de operação.

Os limiares inicialmente adotados para temperatura, umidade e concentrações dos gases devem ser interpretados como parâmetros preliminares de projeto, definidos a partir da literatura técnica e de critérios de engenharia. Esses valores poderão ser ajustados posteriormente por meio de campanhas experimentais, análises estatísticas e procedimentos de otimização baseados nos dados coletados durante a operação da composteira instrumentada.

Da mesma forma, a escolha do algoritmo XGBoost representa uma hipótese inicial para a etapa de classificação automática. Durante o desenvolvimento experimental, pretende-se comparar seu desempenho com outras técnicas de aprendizado de máquina, como Random Forest, LightGBM e redes neurais compactas, considerando simultaneamente critérios de precisão, custo computacional, consumo energético e viabilidade de execução embarcada.

Como continuidade desta pesquisa, prevê-se o desenvolvimento de um protótipo funcional, a instrumentação de unidades experimentais de compostagem, a aquisição contínua de dados ambientais e operacionais, o treinamento supervisionado dos modelos de aprendizado de máquina e a validação da estratégia de controle proposta. Pretende-se ainda investigar técnicas de calibração automática dos sensores, compensação dos efeitos de temperatura e umidade sobre sensores semicondutores, além da avaliação da robustez da arquitetura frente às variações naturais do processo de compostagem.

Espera-se que os resultados dessas etapas permitam validar experimentalmente a arquitetura proposta e estabelecer uma plataforma de referência para aplicações de Inteligência Artificial embarcada em processos de compostagem, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais e à agricultura inteligente.

6. CONCLUSÕES

A arquitetura de Sistema Ciberfísico apresentada viabiliza o monitoramento inteligente e o controle em malha fechada da compostagem de cascas de pequi. A inovação principal concentra-se na execução embarcada de algoritmos de aprendizado de máquina e no controle preditivo focado no oxigênio, permitindo intervenções antes do estabelecimento de zonas anaeróbias.

Embora fundado em princípios metodológicos sólidos de Engenharia Ambiental e IoT, o sistema requer validação prática. Como trabalhos futuros, incluem-se a construção do protótipo, calibração in loco e campanhas experimentais para treinar os modelos classificadores e refinar os limiares operacionais da FSM, impulsionando tecnologias sustentáveis voltadas ao bioma Cerrado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG (grant n OET-00243-26), UFVJM, Centro Universitário UniÚnica e ao Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas (PPGMCS/UNIMONTES).

REFERENCES

ANATEL. **Diagnóstico de conectividade rural no Brasil:** dados de cobertura por município. Brasília: Agência Nacional de Telecomunicações, 2023.

- BANERJEE, S.; CHOUDHARY, M. TinyML: Machine Learning for Microcontrollers with TensorFlow Lite. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EDGE COMPUTING, 7., 2021, Virtual. **Proceedings...** IEEE, 2021. p. 112–118.
- BECK-FRIIS, B. *et al.* Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, n. 4, p. 423–430, 2001.
- BRASIL. Instrução Normativa SDA nº 25, de 23 de julho de 2009. Normas sobre as especificações e as garantias dos fertilizantes orgânicos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 28 jul. 2009.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series: Errata**. ECO v3 rev. 1.1. Xangai: Espressif Systems, 2022. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_errata_en.pdf.
- FEW, S. **Information Dashboard Design: The Effective Visual Communication of Data**. 2. ed. Burlingame: Analytics Press, 2013.
- HAMELERS, H. V. M. **A mathematical model for composting kinetics**. 2001. 291 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) — Wageningen University, Wageningen, 2001.
- MASON, I. G.; MILKE, M. W. Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems. **Waste Management**, v. 25, n. 5, p. 481–500, 2005.
- SILVA, R. A. *et al.* Aproveitamento integral do pequi: da polpa à casca no bioma Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 11., 2020, São Cristóvão. **Anais...** São Cristóvão: ABA, 2020.
- SOUSA, F. C. de *et al.* Caracterização físico-química da casca do pequi (*Caryocar brasiliense*) e potencial para aproveitamento agroindustrial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 9, p. 643–648, 2018.