

UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS EMBARCADOS PARA O MONITORAMENTO DE AFLATOXINA NA CULTURA DO AMENDOIM (*ARACHIS HYPOGAEA*) EM SILOS DE ARMAZENAMENTO

Luyri Rickelmi de Souza Ferreira¹, Ryan Gustavo Pedrozo Dos Santos², João Victor Vanzela Buzato², Caio Luis Junco Petelin², Mariana Matulovic da Silva Rodrigueiro³, Flávio José de Oliveira Moraes³

¹ Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, Brasil, (luyri.ferreira@unesp.br)

² Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, Brasil, (ryan.gp.santos@unesp.br)

² Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, Brasil, (joao.buzato@unesp.br)

² Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, Brasil, (caio.junco-petelin@unesp.br)

³ Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, Brasil, (flavio.morais@unesp.br)

³ Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, Brasil, (mariana.matulovic@unesp.br)

Resumo: Durante o armazenamento do grão as condições em volta torna-se um ponto de alerta, devido a possibilidade de desenvolvimento de fungos que podem afetar a qualidade do produto e segurança alimentar. A presença de aflatoxina é um desses problemas, proporcionada por altas concentrações de temperatura e umidade. A pesquisa tem como objetivo desenvolver um sistema que possibilita monitoramento dessas variáveis com o uso de sistemas embarcados dentro de um silo durante o processo de armazenamento.

Palavras-chave: Aflatoxina. Concentração de CO₂. Monitoramento. Temperatura. Umidade Relativa.

INTRODUÇÃO

A China destaca-se como o principal produtor, sendo responsável por aproximadamente 40% da produção global. No contexto americano, o Brasil ocupa a terceira posição entre os maiores produtores do continente, com um aumento significativo de produtividade (11,7%) nas safras 2021-2022, e uma estimativa de 842,1 mil toneladas para a safra de 2023/24. O estado de São Paulo é o principal polo produtor nacional, respondendo por 90% da produção brasileira, com as principais áreas produtoras localizadas nas regiões da Alta-Mogiana e Alta-Paulista. Atualmente, cerca de 80% da produção brasileira é destinada à exportação, principalmente para Rússia, Argélia, África do Sul e Polônia, países que valorizam a qualidade dos grãos, especialmente quanto aos níveis de contaminação por aflatoxinas (Silva *et al.*, 2025).

Com o decorrer dos anos, questões como a redução de desperdício e a preservação da qualidade do amendoim durante o armazenamento tornaram-se pontos cruciais na cadeia produtiva. Para solucionar esses desafios, tecnologias avançadas de

armazenamento, como silos com controle de temperatura e umidade, têm possibilitado a significativa diminuição de perdas. Estes avanços tecnológicos permitem identificar precocemente alterações na qualidade, evitando a rancidez oxidativa e a contaminação por aflatoxinas, especialmente em ambientes de alta temperatura e umidade, proporcionando assim um aumento significativo na eficiência produtiva e na segurança alimentar (Liu; Jiang; Chen, 2022).

O monitoramento na etapa de armazenamento em silos é fundamental para a preservação da qualidade do amendoim, permitindo controlar fatores ambientais que podem comprometer a integridade do grão e prevenir a proliferação de fungos e bactérias no interior das estruturas de armazenamento (Madhukar; Pandey; Dixit, 2025). Os parâmetros mais rigorosamente monitorados incluem temperatura, umidade relativa e concentração de CO₂, variáveis críticas que influenciam diretamente a estabilidade microbiológica e bioquímica dos grãos (Lidia *et al.*, 2022).

Um dos principais riscos associados a condições inadequadas de temperatura e umidade durante o armazenamento do amendoim é a contaminação por aflatoxinas (AFs), metabólitos secundários carcinogênicos produzidos principalmente por fungos das espécies *Aspergillus flavus*, *A. parasiticus* e *A. nomius*. Estas micotoxinas estão associadas a efeitos mutagênicos, teratogênicos e hepatocarcinogênicos, sendo que a aflatoxina B1 (AFB1) foi classificada pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) no Grupo I, indicando sua natureza comprovadamente carcinogênica para humanos. O amendoim (*Arachis hypogaea* L.), por ser uma leguminosa subterrânea com interação direta com o solo, apresenta alta suscetibilidade à contaminação por aflatoxinas, o que representa um sério problema de fitossanitário que afeta a qualidade do grão e reduz seu valor comercial (Da Silva *et al.*, 2025).

No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) estabeleceu o limite máximo tolerável de 20 ng g⁻¹ para aflatoxinas totais em amendoim e produtos derivados, valor que é significativamente mais alto que os limites estabelecidos pela União Europeia (4 ng g⁻¹) e por países importadores como Rússia e África do Sul (10 ng g⁻¹). O consumo de produtos contaminados por aflatoxinas representa um risco significativo à saúde humana e animal, sendo essencial o monitoramento rigoroso da cadeia produtiva do amendoim e a avaliação do grau de exposição como medidas para minimizar os riscos à saúde pública (Da Silva *et al.*, 2025).

A utilização de dispositivos eletrônicos/sensores possibilitam o monitoramento desses fenômenos é de extrema importância, pois, permite que esses eventos sejam controlados antes de ocorrências que possam prejudicar a qualidade do grão. (Coradi *et al.*, 2022).

MATERIAL E MÉTODOS

Por características, a aflatoxina é uma micotoxina desenvolvida pelos gêneros conhecidos como *Aspergillus flavus* e *parasiticus*, condições extremas podem levar ao desenvolvimento do gênero (Saita e Claudio, 2019). A presente pesquisa tem como objetivo monitorar os fatores de podem contribuir para o desenvolvimento da aflatoxina no amendoim no processo de armazenamento em silos, com a utilização de sistemas embarcados possibilitando que os dados obtidos sejam transmitidos para um interface ao operador. A utilização de microcontroladores acoplados a sensores para o monitoramento de variáveis, sejam elas ambientais ou agrícolas, torna-se uma ferramenta de grande importância, proporcionando resultados mais eficientes. (Da Silva Souza e Silva, 2023). Atualmente o uso de tecnologias está comumente relacionadas com a indústria 4.0 dentro do setor do agronegócio proporcionando aumento na

produtividade (Costa; Oliveira; Mota, 2018; Martins e Barbosa, 2019; Stroparo, 2024).

Temperatura e Umidade Relativa

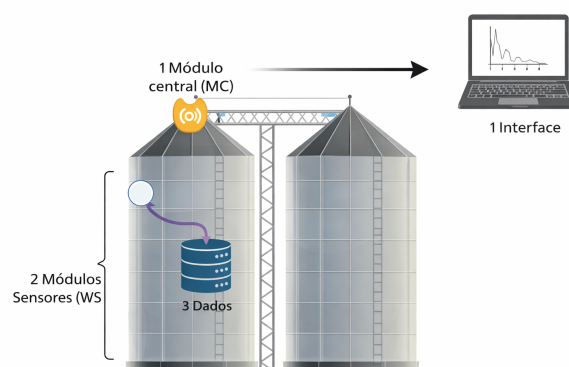
O surgimento de agentes externos dentro de silos pode estar relacionado com a falta de controle sobre a temperatura interna (TI) ou Temperatura ambiente do silo (TAS), umidade relativa (UR) causando deterioramento de grãos, além de proporcionar a liberação de CO₂ para o entorno do silos afetando o grão (Ferreira e Bracht, 2024; Leal e Coradi, 2022). Estudos apontam uma faixa ideal para desenvolvimento do gênero *aspergillus* no processo de armazenamento, variando de 16% a 30% de umidade do grão, sendo agravada em períodos mais chuvosos. A temperatura para a detecção pode variar de 12 °C a 48 °C, entretanto 33 °C e 34 °C torna-se uma ótima condição, além da alta concentração de UR variando de 80% a 100 % (Saita e Claudio, 2019; Martins, 2015; Martins *et al.*, 2023).

CO₂

A falta de monitoramento causado pelo aumento das variáveis de temperatura e umidade pode proporcionar a liberação de gás carbono (CO₂) possibilitando o desenvolvimento de alguns fungos (Ferreira e Bracht, 2024; Leal e Coradi, 2022; Pimentel *et al.*, 2024).

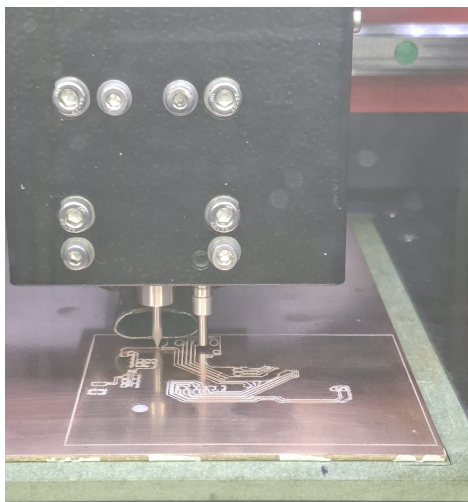
O monitoramento de temperatura, umidade relativa e CO₂ aplicados em sistemas empacados possibilitará ter controle sobre as condições e melhorar a tomada de decisões. O presente trabalho busca desenvolver módulos com baixo custo e consumo de energia que possibilita medir os dados das condições mandando até uma interface de um operador. O módulo central localizado no topo do silo será o cérebro de toda a operação e o módulo dos sensores será responsável por coletar os dados e enviar ao módulo central, localizado na parte lateral.

Figura 1. Diagrama geral: Distribuição dos módulos no silo de amendoim.



O software utilizado para a construção da pesquisa é o KiCad, possibilitando desenvolver os projetos em suas áreas do esquemático e do PCB, além de permitir a visualização 3D. O uso de uma prototipadora de circuitos impressos nesse processo é de extrema importância para o desenvolvimento dos módulos. A linguagem C e C++ possibilita desenvolver códigos, a ferramenta é o *Code Composer Studio* (CCS).

Figura 2. Prototipadora: TTP indústrias mecânicas Ltda.



Segundo a modelo do datasheet da *texas instruments*, o sensor TMP 236 permite realizar medições de temperatura, operando como uma faixa de temperatura de -10 °C a 125 °C, trabalhando como uma tensão de 3.1V a 5.0 V. Em sua configuração existem três pinagens, GND, VDD e Vout.

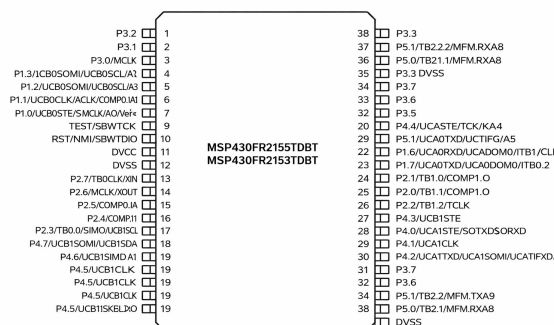
O sensor HDC 1080 é um dispositivo eletrônico de comunicação I²C (SDA e SCL), possibilitando a medição de umidade relativa do ar. As pinagens do sensor são seis, no entanto, utiliza-se somente quatro delas, SDA, SCL, GND e VDD

O MH410-D permite a medição da concentração de CO₂, possibilitando uma comunicação UART (RX e TX). Segundo o datasheet da *Winson* a faixa de tensão que o dispositivo opera é de 3.6 V a 5.0 V, até -20 °C a 60 °C. As pinagens do MH410-D configuram-se GND, VDD, Vout, RX e TX.

O microcontrolador é um circuito integrado, que possui conversores tanto para A/D e D/A, além de pinos de destinados para pontas *Input* e *Output* programáveis, executados operações de armazenamento, leitura e escrita de dados (Araujo *et al.*, 2019). Para a presente pesquisa, utilizar a módulo MSP 430 FR 2155, onde segundo o datasheet da *texas instruments* suas características são uma arquitetura de 38 pinos, operando a uma tensão de alimentação de 3.6 V a 1.8 V, além de trabalhar com uma temperatura de -40 °C a 105 °C. Outro ponto importante é que o protocolo de comunicação de dispositivos externos para o micro pode ser feito por

UART, I²C, IrDA e SPI. A figura abaixo representa a configuração das portas do MSP430FR2155.

Figura 3. Configuração das portas do microcontrolador.



Comunicação

Devido aos avanços tecnológicos, o uso de sensores inteligentes que possibilitam uma conexão sem a necessidade de fios, tem se demonstrado destaque dentro do desenvolvimento de pesquisas, possibilitando que dados sejam coletados e transmitidos. Atualmente, tais IoT ou Internet das coisas tem se tornado presente em diversos setores sociais, graças ao seu baixo custo de implementação. A comunicação pode ser feita com o uso de internet (Wi-fi) para distâncias curtas e LoRa/WSN para distâncias de longo alcance (De Albuquerque *et al.*, 2025; Kunem e Santos, 2025; Luiz Junior *et al.*, 2025). Os dados que forem coletados pelos sensores podem ser transmitidos por duas vias, bluetooth, para uma comunicação rápida utilizando um módulo JDY-31 com um alcance de 30 metros (Li e Ma, 2024) e um E32 *LoRa* para um distanciamento maior em relação ao módulo bluetooth (Abubeker e Nuthalapati, 2025). A comunicação será realizada pela UART, utilizando as portas RX e TX do microcontrolador, além das portas SDA e SCL para o protocolo I²C.

Gerenciamento de energia

O uso de baterias íon-lítio possibilitam um bom desempenho com uma atividade duradoura, entretanto, um grande problema relacionado ao seu uso é a fuga térmica, causando acidentes, para contornar, é necessário um sistema eficaz para o gerenciamento garantindo a segurança (Chen *et al.*, 2022; Takyi-Aninakwa *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento do módulo central (MC) é de extrema importância para a pesquisa, pois é onde se encontra o MCU MSP430FR2155, *LoRa* E32 e JDY-31. Além disso, um outro módulo/placa

desenvolvido especificamente para os sensores (MS): TMP 236, HDC 1080 e MH 410 D.

Figura 4. Aba a visualização 3D do módulo central (MC) de PCB do KiCAD.

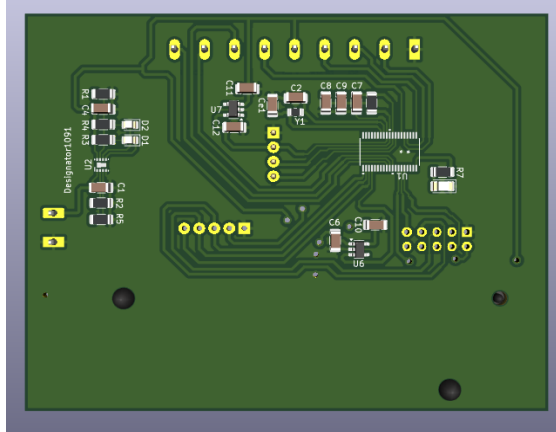


Figura 5. Aba a visualização 3D do módulo central (MC) de PCB do KiCAD.

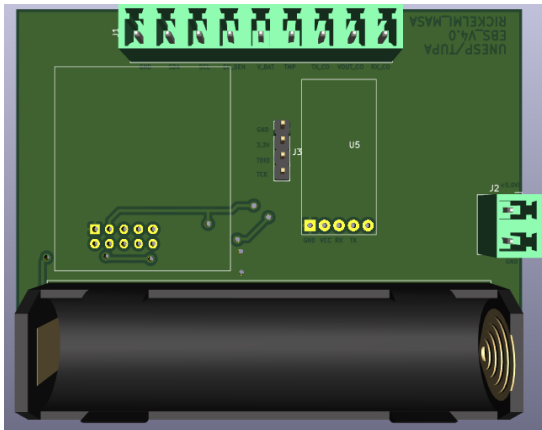
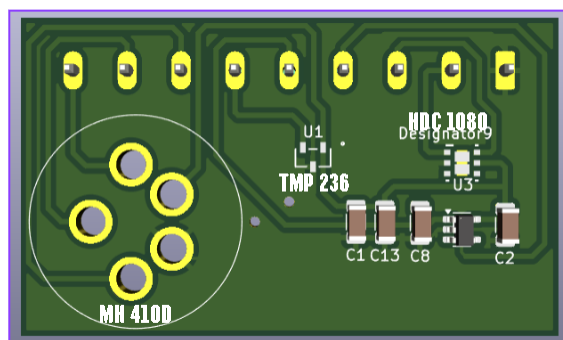


Figura 6 Aba da visualização 3D do módulo sensores (MS) de PCB do KiCAD.

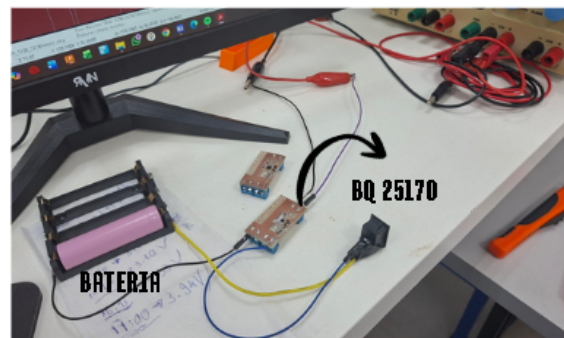


O consumo de energia destinado para a alimentação dos módulos será de duas maneiras, com bateria de lítio-ion (Chip BQ 25170) possibilitar obter cargas de 4.05 V a 4.4 V e com a alimentação externa como um painel solar, para alimentar a bateria caso ela esteja com pouca carga e o sistema como todo. De forma

geral, a utilização do painel solar para a alimentar o sistema será durante o dia, e o uso da bateria será à noite.

Para testes, foi desenvolvido um mini protótipo para o avaliar e experimentar o comportamento do chip BQ 25170. Durante o experimento notou-se que conforme a resistência do VST é maior, menor será a capacidade da bateria suportar a carga. O resistor escolhido foi de 27 K Ω para obter uma tensão de 4.2 V.

Figura 7. Testes com o chip BQ 25170 para alimentação da bateria.



Segundo os resultados, a carga total que a bateria pode suportar é de no máximo 4.1 V. A tensão será necessária para a alimentação dos dispositivos eletrônicos (Micro, Lo-Ra, Bluetooth e Sensores) como o auxílio de reguladores de tensão TPS permitindo regular V_{in} da provinda da bateria para 3.3V, onde o enable (EN) de cada regulador será destinada a uma porta analógica do microcontrolador permitindo habilitar ou desabilitar a alimentação.

As figuras abaixo mostram módulo/placa central para testes, já com a gravação e com a soldagem dos componentes. O uso do gravados (Figura 7) possibilita gravar as programações diretamente para os módulos. O uso do JTAG (GND, 3.3V, TDIO, TCK) possibilita a transmissão do código para a porta do microcontrolador.

Pequenas avaliações já estão sendo feitas no módulo, tais como: A regulação da alimentação do micro e da comunicação, além de teste com a bateria diretamente no módulo central.

Figura 8. Projeto do módulo central (MCU) físico.

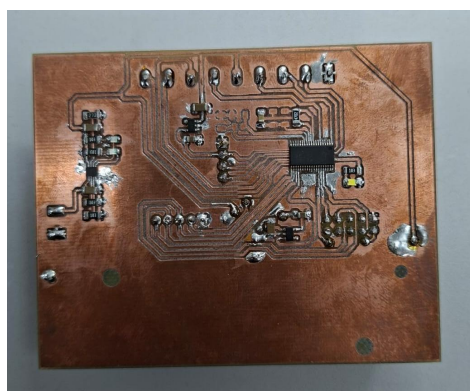


Figura 9. Projeto do módulo central (MCU) físico.

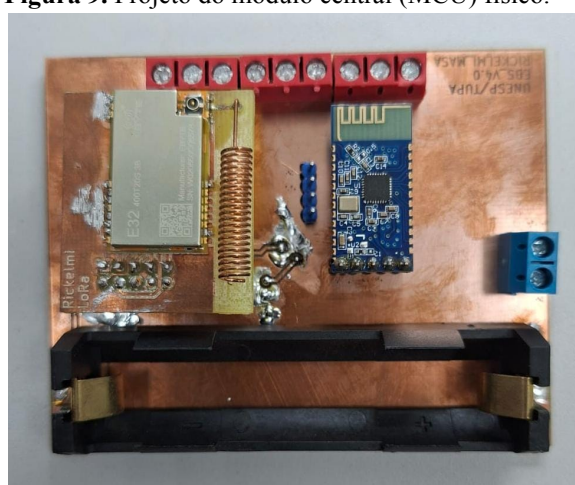


Figura 10. Teste para programação: Gravador e Projeto do módulo central (MCU)

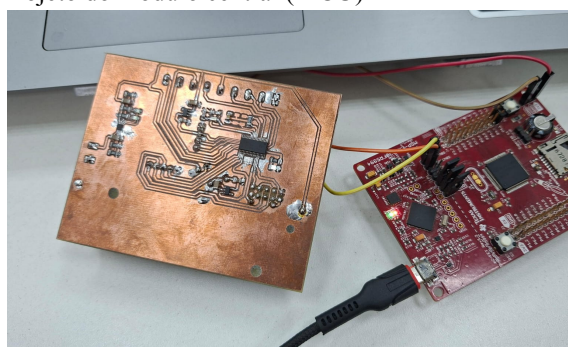
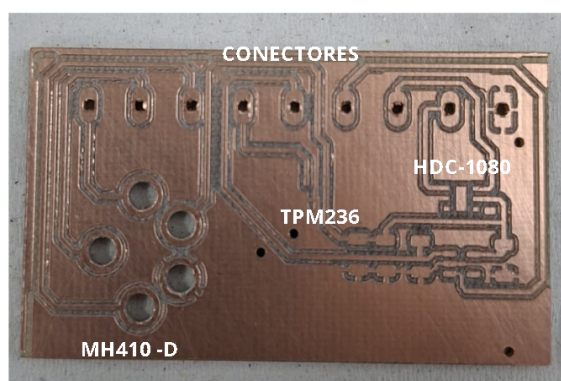


Figura 11. Projeto do módulo sensores(MS) físico.



O desenvolvimento dos módulos está em constante evolução, e ao término da pesquisa espera-se realizar o monitoramento das variáveis temperatura, umidade relativa e CO₂ contribuindo para a medição desses fatores que podem afetar a qualidade do grão e posteriormente desenvolvendo a aflatoxina no silos de amendoim, permitindo que os dados obtido sejam transmitidos por comunicação via bluetooth pelo módulo JDY-31 (App Serial Bluetooth Terminal) e por rádio frequência (LoRa E32), além dos dados sejam mandados a nuvens, via Tago.io. Os dispositivos se comunicam como o microcontrolador pela comunicação UART (RX e TX).

CONCLUSÃO

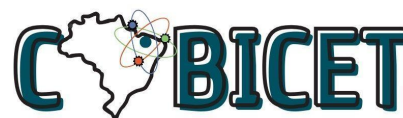
Ao final desta pesquisa espera-se que a aplicação de sistemas embarcados possibilite o monitoramento de aflatoxina dentro de um silo a partir de um consumo de energia baixo e com custo acessível. O desenvolvimento do módulo sensor e a elaboração da placa de circuito impresso (PCB) representam um avanço significativo para o monitoramento em silos de amendoim, permitindo a coleta contínua e precisa de dados: temperatura, umidade relativa e CO₂ transmitidas em tempo real e de boa aplicação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus pela oportunidade de realizar este trabalho, à Faculdade de Ciências e Engenharia da Universidade Estadual Paulista pela disponibilidade, bem como pelo uso de seus equipamentos e laboratórios, além da Bolsa CNPq pelo financiamento. Agradeço também aos meus familiares, companheiros de laboratório e professores por todo o suporte necessário para o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

ABUBEKER; NUTHALAPATI, Aravind. Estrutura de automação de reservatório de água habilitada para LoRaWAN baseada em nuvem. **Procedia Computer Science**, v. 252, p. 768–775, 2025.



Araujo, Warley Monteiro et al. Visão geral sobre microcontroladores e prototipagem com arduino. **Revista tecnologia em projeção**, v.10, n.1. p. 36 -46. 2019

CHEN, Rui et al. Power batteries health monitoring: a magnetic imaging method based on magnetoelectric sensors. **Materials**, v. 15, n. 5, p. 1980, 2022.

COSTA, Cainã Lima; OLIVEIRA, Letícia de; MÓTA, Léia Michele Ferreira de Souza. Internet das coisas (IOT): um estudo exploratório em agronegócios. **Anais.. VI Simpósio da Ciência do Agronegócio**. Porto Alegre, RS: CEPAN/UFRGS, 2018.

CORADI, Paulo Carteri.; LUTZ, Everton.; DOS SANTOS BILALHAVA, Nairiane.; JAQUES, Lanes Beatriz Acosta.; LEAL, Marisa Menezes.; TEODORO, Larissa Pereira Ribeiro. Protótipo de rede de sensores sem fio e plataforma de Internet das Coisas para monitoramento em tempo real do teor de umidade de equilíbrio intergranular e previsão da qualidade do milho armazenado em silos-bolsa. **Sistemas especialistas com aplicações**, v. 208, n. 118242, p. 118242, 2022.

DA SILVA, André Ribeiro.; ONO, Elisabete Yurie Sataque.; DE SOUZA SUGUIURA, Igos Massahiro.; POMINI, Tuany Marin.; ITANO, Eiko Nakagawa.; KAWAMURA, Osuma.; MACIEL, Leonardo Fonseca.; HIROOKA, Elisa Yoko. Risk assessment of aflatoxin exposure for consumers of in natura and blanched peanuts from Brazil from 2016 to 2019. **Food and chemical toxicology: an international journal published for the British Industrial Biological Research Association**, n. 115437, p. 115437, 2025.

DA SILVA, André Ribeiro.; POMINI, Tuany Marin.; DE QUEIROZ, Mariana Assis.; ONO, Elisabete Yurie Sataque.; MACIEL, Leonardo Fonseca.; HIROOKA, Elisa Yoko. Aflatoxina e segurança microbiana em paçoca de amendoim confeitado comercial produzida no estado de São Paulo – Brasil. **Food control**, v. 164, n. 110576, p. 110576, 2024.

DA SILVA SOUZA, Fábio; SILVA, Paulo Henrique Lopes. UM PROTÓTIPO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO AMBIENTAL PARA AGRICULTURA. 2023.

DE ALBUQUERQUE, Leandro Calixto Tenório; LEITE, Alisson Rodolfo; FILHO, Luís Roberto Almeida Gabriel; GABRIEL, Camila Pires Cremasco. APLICAÇÕES DA LÓGICA FUZZY,

SENSORIAMENTO E TECNOLOGIAS IOT NO MONITORAMENTO DA AMBIÊNCIA EM AVIÁRIOS DE POSTURA: UMA REVISÃO DE ESCOPO. **ARACÊ**, v. 7, n. 12, p. e11348, 2025.

FERREIRA, Rafael Florenciano; BRACHT, Evandro Cesar. SISTEMA DE MONITORAMENTO INTERNO PARA SILOS ELEVADOS DE ARMAZENAGEM DE GRÃOS. Acesso em: 5 de janeiro. 2026.

KUNEN, Adriana; SANTOS, Gilson Ditzel. Mapeando conexões entre tecnologias digitais e florestas urbanas na construção de cidades inteligentes e sustentáveis: uma revisão de escopo. **DRd-Desenvolvimento Regional em debate**, v. 15, p. 610-635, 2025.

LEAL, Marisa Menezes; CORADI, Paulo Carteri. Monitoramento amostral da temperatura, umidade relativa e dióxido de carbono intergranular para estimativa e previsão da perda de matéria seca em grãos de trigo armazenados em silos verticais. 2022.

LIDIA et al. Sistema automatizado de monitoramento de grãos alimentícios para depósito usando IOT. Medição. **Sensores**, v. 24, n. 100472, p. 100472, 2022.

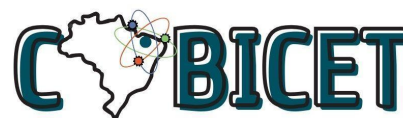
LIU, Kai; MA, Qiongrui. Design and realization of assisted sleep detection system based on Internet of Things technology. In: **2024 3rd International Conference on Electronics and Information Technology (EIT)**. IEEE, 2024. p. 483-487.

LIU, Liangyan.; JIANG, Hu.i; CHEN, Q. Determinação rápida do índice de acidez do amendoim durante o armazenamento por um sistema portátil de espectroscopia no infravermelho próximo. **Infrared physics & technology**, v. 127, n. 104472, p. 104472, 2022.

LUIZ JUNIOR, O. J.; MACEDO, H. R.; WERNECK, P. R.; ARAUJO, A. T. de; BARTZ, R. L.; FEIDEN, A. Aquicultura de precisão: uma revisão sobre soluções de monitoramento em tempo real com o uso de IoT e sensores. **Cuadernos de Educación y Desarrollo - QUALIS A4**, v. 17, n. 12, p. e10307, 2025.

MADHUKAR, Pagini.; PANDEY, Lalit M.; DIXIT, Uday S. EUA Armazenamento de grãos pós-colheita: métodos, fatores e soluções ecológicas. **Food control**, v. 174, n. 111236, p. 111236, 2025.

MARTINS, Artur Virgílio Simpson; BARBOSA, Raul Afonso Pommer. O impacto da internet das



coisas no agronegócio. In: **Congresso Latino Americano de Varejo e Consumo (CLAV)**. 2019.

MARTINS, Ligia Manoel. Ocorrência de fungos e aflatoxinas, cinética da degradação de aflatoxinas durante a torração e modelagem probabilística do risco de exposição pelo consumo de amendoim. **Faculdade de engenharia de alimentos da Universidade Estadual de Campinas-Dissertação de mestrado**. Campinas, 2015.

MARTINS, Rosália de Fátima Ferreira et al. Identificação e quantificação de fungos e aflatoxinas em amendoim (*Arachis hypogaea* L). 2023.

PIMENTEL, F. C.; PEREIRA JUNIOR, C. C. da S.; SOUZA, A. de O.; SILVA, L. M. I. da; CAMPOS, F. A.; ARAUJO, D. de A.; VANIN, L. G. de S.; SOUSA, W. C. de; FREITAS, D. A. F. de. Perdas nas etapas pós-colheita do pré-processamento: um panorama atual da logística brasileira. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 4, p. e4424, 2024.

SAITA, Ana Caroline; CLAUDIO, Marcos Alberto. Efeitos da aflatoxina na comercialização do amendoim. **Revista Interface tecnológica**. v. 16, n. 1, p. 449–459, 2019.

STROPARO, Telma Regina. Transformação digital na agricultura: Impactos da Internet das Coisas (IoT) na eficiência produtiva e sustentabilidade. **LUMEN ET VIRTUS**, v. 15, n. 38, p. 1573–1581, 2024.

TAKYI-ANINAKWA, Paul *et al.* Deep learning framework designed for high-performance lithium-ion batteries state monitoring. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 218, n. 115803, p. 115803, 2025.

YANG, Yu *et al.* Recent advanced implantable nano-micro sensing methods for lithium-ion batteries condition monitoring: a focus review. **Journal of Energy Storage**, v. 137, n. 118694, p. 118694, 2025.