

Monitoramento E Controle De Variáveis Ambientais Locais Para A Conservação De Alimentos: Uma Abordagem Tecnológica Na Prevenção De Micotoxinas Em Despensas Escolares

Franciane Souza Meireles¹, John Dalton Costa Pimentel²,
Vinícius De Lima Lopes³, Fabrício Rodrigues Nunes⁴,
Narja Tayná Gadelha Sousa⁵, Viviane Jesus Da Silva⁶,
Francisco Otávio Miranda Farias⁷

(Estudante De Pós-Graduação, Departamento De Física, Universidade Do Estado Do Amazonas, Brasil)
(Professor Doutor Do Departamento De Física E De Pós-Graduação, Universidade Do Estado Do Amazonas, Brasil)

Abstract:

Background: O artigo aborda o monitoramento e controle de variáveis ambientais locais para a conservação de alimentos, destacando a importância da gestão eficiente de fatores como temperatura, umidade e ventilação na preservação da qualidade e segurança dos produtos alimentícios. A pesquisa analisa métodos e tecnologias utilizados para a manutenção dessas variáveis dentro de parâmetros ideais, minimizando perdas e otimizando o armazenamento. Além disso, são discutidos os impactos ambientais e econômicos da deterioração dos alimentos e a relevância da implementação de sistemas de monitoramento em tempo real. O estudo conclui que o uso de tecnologias avançadas e estratégias eficazes de controle ambiental contribuem significativamente para a redução do desperdício e a melhoria da eficiência logística na cadeia de suprimentos alimentícia.

Key Word: Monitoramento ambiental, Conservação de alimentos, Qualidade e segurança alimentar, Armazenamento otimizado e Redução de desperdício.

Date of Submission: 01-12-2025

Date of Acceptance: 11-12-2025

I. Introduction

A conservação de alimentos e produtos biológicos sensíveis é um desafio que demanda atenção especial às condições ambientais, uma vez que fatores como temperatura, umidade são determinantes para a manutenção da qualidade e segurança desses alimentos. A deterioração microbiana e fúngica, a perda de propriedades nutricionais e a formação de compostos indesejáveis, como micotoxinas, são consequências diretas da falta de controle ou visualização adequada. Diante disso, a implementação de estratégias eficazes de monitoramento e gestão ambiental torna-se essencial para garantir a integridade dos produtos ao longo de toda a cadeia de armazenamento. Como mostra no estudo de El Sayed et al. (2022), mostram que até 37,6 % das amostras de grãos estão contaminadas por pelo menos uma aflatoxina, evidenciando a necessidade de monitoramento contínuo e de métodos analíticos robustos para contornar essa situação.

A contaminação de alimentos por micotoxinas, produzidas por fungos filamentosos como *Aspergillus*, *Fusarium* e *Penicillium*, é um problema global que afeta tanto a segurança alimentar quanto a saúde pública. Conforme destacado por Prado (2017), essas micotoxinas podem se desenvolver em condições específicas de temperatura e umidade durante o armazenamento, mesmo quando os parâmetros ambientais parecem estar dentro de faixas consideradas seguras. A presença de micotoxinas, como aflatoxinas, ocratoxinas e fumonisinas, está associada a efeitos tóxicos graves, incluindo carcinogenicidade, hepatotoxicidade e imunossupressão, o que reforça a necessidade de um controle rigoroso das condições de armazenamento. El Sayed et al. (2022), reforça a presença de seis micotoxinas — aflatoxinas, tricotecenos, zearalenona, fumonisinas, ocratoxina A e patulina — são as mais prevalentes em alimentos e ração animal, com mecanismos de ação que variam da inibição da síntese proteica à disruptão hormonal. A presença de compostos como aflatoxina B₁, classificada como carcinogênica pelo IARC, e ocratoxina A, associada a nefropatias crônicas, reforça a necessidade de um controle rigoroso das condições de armazenamento. (El Sayed et al., 2022; Shekhar; Raghavendra; Rachitha, 2025). Além disso, a contaminação por micotoxinas pode ocorrer em uma variedade de alimentos, como cereais, grãos, café e produtos derivados, impactando não apenas a qualidade dos produtos, mas também as relações comerciais entre países.

Portanto, a adoção de tecnologias avançadas de monitoramento e a implementação de boas práticas de armazenamento são fundamentais para minimizar os riscos de contaminação e garantir a segurança dos alimentos estocados.

O controle e monitoramento das variáveis de temperatura e umidade em uma despensa escolar, localizada no município de Parintins, no estado do Amazonas, são necessários para garantir a segurança e a qualidade dos alimentos armazenados. A região amazônica, conhecida por seu clima quente e úmido, apresenta condições ambientais que podem favorecer o crescimento de microrganismos, como fungos, e a consequente produção de micotoxinas. Como é destacado por Shekhar, Raghavendra, Rachitha (2025), muitas espécies de fungos exigem atividade de água (aw) $\geq 0,70$ e temperaturas ótimas entre 20 °C e 25 °C para produção de micotoxinas. Esses fatores, somados à falta de controle adequado das condições de armazenamento, podem comprometer a integridade dos alimentos, colocando em risco a saúde dos estudantes que consomem as refeições preparadas na escola, além de causar desperdício de alimentos descartados devido a sua perda total e/ou parcial para a contaminação. Nesse contexto, a utilização de um protótipo que integre sensores de temperatura e umidade, com a possibilidade de automatização para reduzir a umidade quando necessário, pode ser uma estratégia eficaz para mitigar as condições propícias ao crescimento de fungos.

Assim, considerando a relevância do tema e os avanços tecnológicos recentes, este trabalho busca contribuir na conservação de alimentos e produtos biológicos, destacando a importância do monitoramento contínuo e preciso das variáveis ambientais. A partir de uma abordagem prática e fundamentada, pretende-se explorar a eficiência do controle de variáveis ambientais que possam auxiliar na manutenção da qualidade e na redução de perdas, alinhando-se às demandas atuais da indústria e da saúde pública.

A conservação de alimentos e de produtos biológicos sensíveis é um desafio complexo que demanda o controle rigoroso das condições ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a colheita até o consumo final. Esse controle envolve a manutenção de parâmetros críticos, tais como temperatura, umidade e composição atmosférica, que são decisivos para inibir o crescimento microbiano, retardar processos de deterioração e prevenir a produção de compostos indesejáveis, como as micotoxinas. Tais medidas não só preservam as características nutricionais e sensoriais dos produtos, mas também garantem a segurança e a eficácia dos insumos destinados à saúde e à alimentação.

No contexto dos imunobiológicos, as diretrizes estabelecidas pelo Manual de Rede de Frio do Programa Nacional de Imunizações (BRASIL, 2017), demonstram a importância de manter produtos em faixas de temperatura rigorosas de 2°C a 8°C para produtos refrigerados e de -25°C a -15°C para produtos congelados, de forma a preservar suas propriedades físico-químicas e biológicas. Essa estratégia é essencial para assegurar a eficácia dos imunobiológicos ao longo da cadeia do frio e pode ser adaptada para a conservação de alimentos perecíveis, onde o controle ambiental é igualmente crucial para evitar perdas e manter a qualidade.

De maneira análoga, a coleção Senar, Grãos: armazenamento de milho, soja, feijão e café (SENAR, 2018), traz uma abordagem prática e detalhada sobre os desafios no armazenamento de grãos, enfatizando a importância do teor de água, da ventilação adequada e do controle de temperatura para preservar a qualidade dos produtos durante períodos prolongados. Tais práticas demonstram que o sucesso na conservação depende da integração de medidas de controle ambiental que minimizem os danos causados tanto por fatores biológicos quanto por condições climáticas adversas.

Em consonância com essa abordagem, investigações que se debruçaram sobre os efeitos da umidade no armazenamento demonstram, de forma inequívoca, a imprescindibilidade de instituir protocolos de monitoramento e controle estritos, capazes de assegurar a manutenção da qualidade e da inocuidade dos produtos ao longo de todo o processo de estocagem. Taniwaki et al. (2017) mensuraram a atividade de água (aw) de 172 amostras de castanha do Brasil ao longo da cadeia produtiva na Amazônia (floresta, mercados, indústrias e supermercados), obtendo valores de aw entre 0,78 e 0,84 e demonstrando que níveis acima de 0,80 favorecem o crescimento de *Aspergillus* seção Flavi e potencial produção de aflatoxinas. De forma complementar, Baquião (2012) analisou amostras de castanhas coletadas em Itacoatiara (AM) e encontrou aw em torno de 0,97 em frutos frescos da floresta, correlacionando essa alta umidade à concentração média de 207 µg/kg de aflatoxinas totais, valor muito acima dos limites regulamentares. Esses dados evidenciam que o monitoramento contínuo dos parâmetros físico químicos, especialmente da atividade de água, aliado a sistemas de vigilância em tempo real, é fundamental para garantir a qualidade e a inocuidade dos alimentos armazenados na região Amazônica, integrando-se aos demais fatores que regem a segurança microbiológica.

Nesse mesmo escopo, a deterioração microbiana — tema amplamente discutido na literatura — é influenciada por fatores intrínsecos, como atividade de água (aw), pH e composição química, e por variáveis extrínsecas, tais como temperatura e umidade do ambiente. Pinto et al. (2018), ressaltam que alimentos com alta Aw favorecem o crescimento de microrganismos, o que pode levar à perda de características sensoriais e nutricionais. Nesse cenário, Sweeny e Dobson (1998) revisaram os mecanismos de produção de micotoxinas por fungos dos gêneros *Aspergillus*, *Fusarium* e *Penicillium*, demonstrando que condições inadequadas intensificam a biossíntese dessas toxinas. Contudo, o estudo de Rupollo et al. (2006) mostrou que o armazenamento hermético,

ao promover um aumento na concentração de CO₂, pode inibir a produção de micotoxinas mesmo na presença de fungos, destacando a importância de isolamento atmosférico no controle dos riscos microbianos.

A modernização dos sistemas de monitoramento tem desempenhado um papel crucial na gestão dessas variáveis ambientais. Velasco et al. (2020) desenvolveram um sistema IoT baseado em microcontroladores Arduino que integra sensores de temperatura, umidade e outros parâmetros, permitindo o monitoramento remoto e em tempo real das condições de armazenamento em refrigeradores. Complementarmente, Spagnol et al. (2018) demonstraram, por meio de uma revisão abrangente, como a utilização de tecnologias RFID e de redes de sensores sem fio (RSSF) pode melhorar a rastreabilidade e a intervenção imediata em caso de desvios, otimizando a cadeia do frio e minimizando perdas. Tais inovações tecnológicas não só asseguram a qualidade dos produtos durante o transporte e o armazenamento, mas também possibilitam uma gestão mais eficiente dos recursos logísticos.

Estendendo esse arcabouço de práticas ao contexto amazônico, os estudos sobre castanha do Brasil corroboram que o rigor no controle de teor de água se mantém tão vital quanto no armazenamento de cereais. Assim como na cadeia da castanha do Brasil, onde a manutenção de atividade de água abaixo de 0,80 inibe a síntese de aflatoxinas, afirmando pelas diretrizes do Programa Nacional de Imunizações, demonstram que parâmetros precisos de temperatura e umidade são igualmente determinantes para preservar a eficácia de produtos biológicos sensíveis.

Reconhecendo o paralelo entre esses setores, a adoção de soluções tecnológicas de monitoramento em tempo real surge como resposta unificadora, permitindo assegurar as condições ideais tanto de vacinas quanto de alimentos perecíveis. Dessa forma, a integração de boas práticas de manuseio, normas de cadeia de frio e sistemas IoT não apenas reforça a segurança e qualidade dos insumos, mas configura um protocolo holístico aplicável a toda a cadeia de produtos, de grãos a imunobiológicos.

Em síntese, a conservação de alimentos e imunobiológicos depende de um gerenciamento ambiental integrado que combina o rigor na manutenção de condições ideais com o uso de tecnologias avançadas de monitoramento.

II. Material And Methods

A metodologia deste trabalho foi estruturada com o objetivo de investigar as condições ambientais de uma despensa escolar, localizada no município de Parintins, no estado do Amazonas, e propor um sistema de monitoramento automatizado para controle de temperatura e umidade, visando prevenir a contaminação por fungos filamentosos nos alimentos estocados. A metodologia foi dividida em etapas que abrangem a caracterização do local, a coleta de dados ambientais, a configuração do sistema de monitoramento e a análise dos dados coletados. A discussão sobre possíveis soluções e resultados será apresentada posteriormente, com base nas evidências obtidas.

A seguir são descritas as etapas para a caracterização do local de estudo e suas atribuições.

Descrição das condições de temperaturas para armazenamento dos alimentos:

A região Amazônica é submetida a um clima equatorial úmido, com temperatura média anual em torno de 25 °C – oscilando entre 22,3 °C e 31,4 °C – e precipitação anual superior a 2 800 mm, o que eleva a umidade relativa do ar para níveis frequentemente acima de 80 % (MACHADO LIMA ET AL., 2021). Mesmo pequenas flutuações térmicas sazonais (aproximadamente 1 - 2 °C) podem alterar significativamente o teor de água nos alimentos, impactando sua estabilidade microbiológica e sensorial (JOSEPH; SOUZA; SABINO, 2021). Em depósitos escolares e unidades de beneficiamento, essa combinação de calor constante e alta umidade cria um ambiente propício para o crescimento de fungos e bactérias, exigindo sistemas de climatização passiva e ativa eficazes.

Yokoya, Antunes e Jordão (1971), demonstraram que, em condições típicas de armazenamento na Amazônia em castanhas do Pará descascadas sujeitas a 26–28 °C e umidade relativa superior a 80 %, apresentaram ampliação do crescimento fúngico e acidez lipídica elevada, enquanto a manutenção em casca, com teor de água em 6,8 % e UR de 80 %, prolongou a conservação por até seis meses. Para grãos e sementes, evidências indicam que temperaturas abaixo de 20 °C reduzem expressivamente a deterioração microbiana, mas tais faixas raramente são atingidas sem equipamentos de refrigeração. Segundo Machado (2000, p. 12), as condições de armazenagem devem manter o produto em faixa de 0 °C a 10 °C para minimizar a atividade microbiana. Nesse sentido, recomenda-se a refrigeração entre essa faixa de temperatura para produtos sensíveis como estratégia adaptável mesmo para regiões equatoriais.

Diante desse cenário, a adoção de protocolos de monitoramento em tempo real – com sensores de temperatura e umidade – aliada a soluções de climatização, torna-se fundamental para evitar perdas alimentícias e assegurar a qualidade e inocuidade dos alimentos em toda a cadeia de armazenamentos em regiões de altos níveis de umidade e temperatura como Amazônia.

Descrição da Despensa Escolar:

Foi escolhida uma despensa escolar de uma Escola Estadual da rede Amazônica de Ensino Fundamental e Médio, localizada no município de Parintins como local de estudo. É um ambiente fechado, onde são armazenados alimentos perecíveis, como grãos, cereais e outros produtos sensíveis à umidade e temperatura. A despensa conta com prateleiras de madeira para armazenamento dos alimentos, mas não possui sistemas de controle robusto de temperatura ou umidade, além de uma climatização de um ar-condicionado de janela. A ventilação é natural, dependendo de janelas e portas, o que pode levar a variações significativas nas condições ambientais internas conforme a movimentação de funcionários. A falta de um sistema de refrigeração ou desumidificação torna o ambiente propício para a proliferação de fungos e a deterioração dos alimentos.

Coleta de Dados Ambientais:

Para monitorar as condições ambientais da despensa, foram utilizados dois sensores de temperatura e um sensor de umidade (modelo AHT25), conectados a um microcontrolador ESP32. O sensor AHT25 foi escolhido por sua precisão e capacidade de medir tanto a temperatura quanto a umidade relativa do ar. Os sensores foram posicionados em pontos estratégicos da despensa, considerando a distribuição dos alimentos e a circulação de ar. Um sensor foi instalado próximo às janelas, onde há maior variação de temperatura, e outro no centro da despensa, onde os alimentos são armazenados em maior quantidade.

Configuração do Sistema de Coleta de Dados:

O microcontrolador ESP32 foi configurado para coletar dados de temperatura e umidade a cada 5 minutos, durante um período de uma semana. Os dados foram transmitidos via Wi-Fi para a plataforma Adafruit IO (<https://io.adafruit.com/>), que permite o armazenamento e visualização em tempo real das informações coletadas. A plataforma foi configurada para gerar gráficos e alertas em caso de variações significativas nas condições ambientais.

O sistema de monitoramento foi alimentado diretamente por uma tomada elétrica disponível na despensa, sem a necessidade de baterias ou sistemas de backup. O ESP32 foi conectado a um adaptador de energia compatível, garantindo um fornecimento contínuo de energia durante todo o período de coleta de dados. A escolha por uma fonte de energia fixa foi feita para garantir a estabilidade do sistema e evitar interrupções no monitoramento.

Análise dos Dados Coletados:

Os dados coletados pelos sensores foram armazenados na plataforma Adafruit IO e posteriormente exportados para análise, em documento de data frame. Foram utilizadas ferramentas de análise de dados, como planilhas eletrônicas e softwares de visualização gráfica, para identificar padrões de temperatura e umidade ao longo do período de monitoramento. A análise focou em identificar momentos de temperatura e umidade que pudessem favorecer o crescimento de fungos filamentosos.

Impacto na Operação da Despensa:

A instalação dos sensores e do sistema de monitoramento na despensa da Escola Estadual da rede Amazônica foi cuidadosamente planejada para garantir que as operações diárias do local não fossem afetadas. O posicionamento dos equipamentos foi definido de forma estratégica, evitando interferências no fluxo de trabalho dos funcionários responsáveis pelo armazenamento e manuseio dos alimentos. Os sensores de temperatura e umidade (AHT25) foram instalados em locais de fácil acesso para manutenção, mas sem ocupar espaços essenciais para a movimentação de produtos ou pessoas.

III. Result

O controle rigoroso das variáveis ambientais é essencial para a conservação de alimentos e para a prevenção de contaminações por micotoxinas em despensas escolares. Através da análise dos fatores que influenciam a deterioração dos alimentos, identificou-se que a temperatura e a umidade exercem papel determinante no desenvolvimento de microrganismos e na degradação dos produtos armazenados. O estudo de caso realizado em uma escola, localizada em Parintins, no Amazonas, evidenciou a vulnerabilidade da despensa escolar ao clima quente e úmido da região amazônica. Esse cenário favorece a proliferação de fungos e bactérias, tornando o armazenamento inadequado um potencial ameaça à segurança alimentar dos estudantes. A pesquisa apontou que, sem um controle eficaz de temperatura e umidade, há um aumento significativo no risco de degradação dos alimentos, levando ao descarte precoce e ao consequente desperdício.

A abordagem na revisão bibliográfica, as diversas soluções tecnológicas que podem ser empregadas para otimizar o controle das condições ambientais em despensas e estoques de alimentos, consiste no sistema baseado em Internet das Coisas (IoT), sensores de temperatura e umidade e automação para controle de ventilação, identificado como estratégia eficaz para manter a qualidade dos produtos armazenados. Modelos de

monitoramento já empregados em outros setores, como a cadeia do frio de imunobiológicos, podem ser adaptados para aplicação no armazenamento de alimentos perecíveis, garantindo que os parâmetros ambientais permaneçam dentro de faixas seguras.

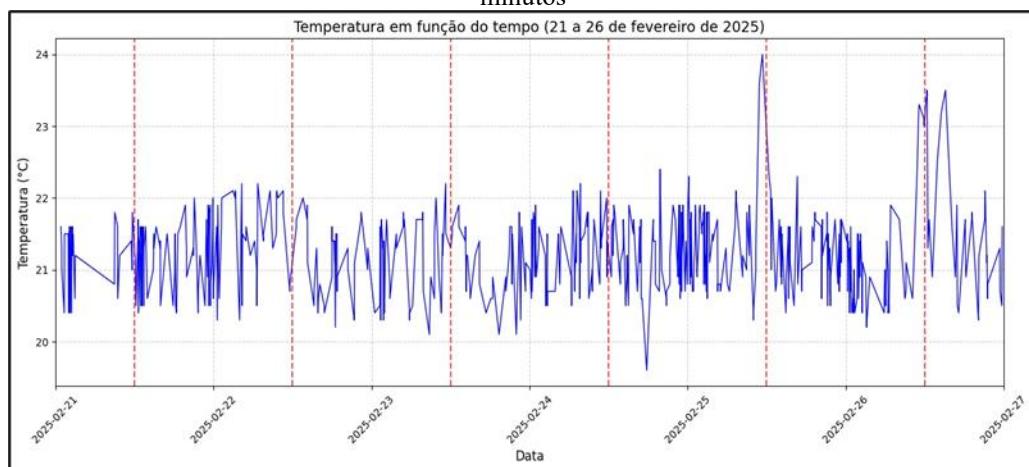
A pesquisa identificou quatro benefícios principais da implementação de sensores ambientais e sistemas automatizados para o controle das condições de armazenamento em despensas escolares. Abaixo, cada um desses tópicos é detalhado com base nas evidências apresentadas.

Redução de perdas por deterioração de alimentos em função da temperatura e umidade

A instalação de sensores de temperatura e umidade possibilita um monitoramento contínuo das condições ambientais dentro da despensa. Dessa forma, qualquer variação indesejada pode ser identificada rapidamente, pois os dados são transmitidos em tempo real, permitindo que medidas corretivas sejam adotadas antes que os alimentos sejam comprometidos.

A série temporal da temperatura apresentou comportamentos distintos para cada dia da semana, destacamos o dia 25, a transição para o dia 26 e pôr fim ao dia 27 de fevereiro registrados na despensa escolar, sendo os dias monitorados separados por linhas tracejadas em vermelho indicados na figura 1.

Table 1: Medidas coletadas da variável temperatura do dia 21 a 27 de fevereiro pelo sensor AHT25 a cada 5 minutos



No dia 25 de fevereiro foi registrado uma anomalia pelo sensor de temperatura AHT25, indicando uma queda brusca de temperatura dentro da despensa, abaixo de 20°C (Figura 1), ou seja, tornou o ambiente mais frio e, portanto, mantendo a umidade dentro da despensa escolar abaixo dos 50% (Figura 2), seguindo por uma elevação da temperatura para 22°C, provocando o efeito inverso na umidade mencionado anteriormente, logo ultrapassou os 70% de umidade dentro da despensa, propiciando um risco considerável para a conservação dos alimentos que sofrem com esta inversão térmica brusca.

Table 2 : Medidas coletadas da variável temperatura do dia 21 a 27 de fevereiro pelo sensor AHT25 a cada 5 minutos.

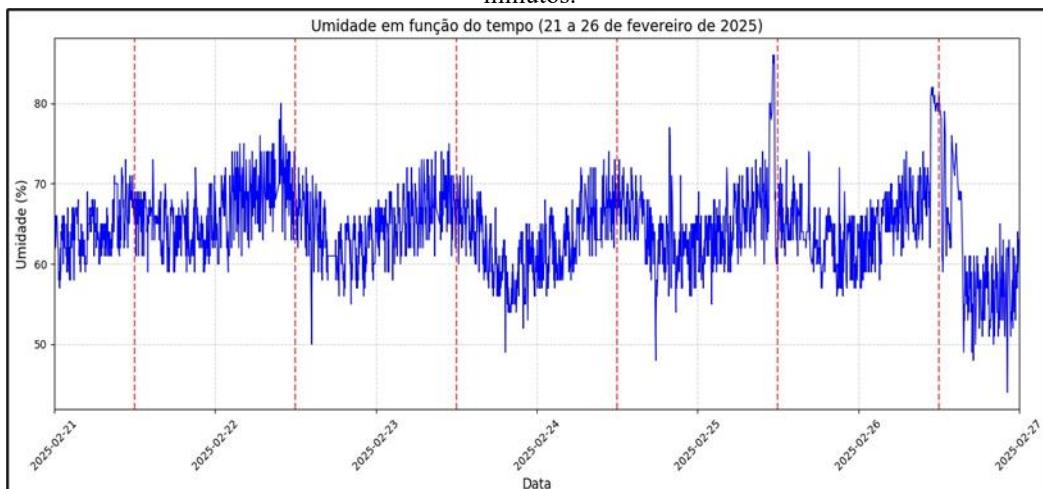


Table 2: Durante a transição para o dia 26 fevereiro o sensor AHT25 registrou um pico de temperatura, no valor de 24°C dentro da despensa, exigiu uma performance maior do ar-condicionado para equilibrar com a temperatura externa, portanto, como consequência teve um aumento considerável de umidade dentro da despensa, acima dos 80%, (Figura 2), comprometendo a segurança de conservação dos alimentos contra os microrganismos.

O sensor AHT25 registrou um pico de temperatura acima dos 23°C, seguido por uma queda gradual em torno dos 21°C e por fim retornado a um valor acima dos 23°C no dia 27 de fevereiro. Nestes três picos mencionados, a umidade ficou superior a 80%, no pico de queda a umidade registrada está abaixo dos 60% e por último retornado para o valor acima dos 80% respectivamente.

A identificação antecipada de pontos críticos de aumento ou redução de temperatura e umidade dentro da despensa pelo uso de sensores que atuam em tempo real, evita a contaminação e o descarte de lotes inteiros de alimentos, reduzindo perdas e custos. Essas estratégias aumentam a vida útil dos alimentos armazenados, evitando desperdícios e garantindo maior aproveitamento dos produtos.

Minimização de riscos à saúde pública, evitando intoxicações alimentares causadas por micotoxinas

As micotoxinas são substâncias tóxicas produzidas por fungos como Aspergillus, Fusarium e Penicillium, que podem contaminar alimentos armazenados em condições inadequadas. Entre as principais micotoxinas, destacam-se:

A ingestão de alimentos contaminados por micotoxinas pode provocar diversos efeitos tóxicos em seres humanos, condição chamada de aflatoxicose. Aflatoxinas, associadas a efeitos carcinogênicos e hepatotóxicos. Ocratoxinas, que afetam os rins e o sistema imunológico, Fumonisinas, ligadas a distúrbios gastrointestinais e complicações neurológicas.

A ingestão de alimentos contaminados com micotoxinas pode causar doenças graves, especialmente em crianças e adolescentes que fazem uso da alimentação escolar, que são mais vulneráveis a intoxicações alimentares. O monitoramento das variáveis ambientais como a temperatura e umidade permite controlar os fatores que favorecem o crescimento de fungos e a produção dessas substâncias tóxicas. Além disso, a automação do monitoramento possibilita a detecção precoce de condições favoráveis que são mencionadas neste estudo, quando ocorre uma elevação ou queda de temperatura que propiciam principalmente o aumento de umidade, que favorecem ao desenvolvimento de micotoxinas, apontado pelos registros de inversões térmicas dentro da despensa escolar, evitando a contaminação em larga escala e protegendo a saúde dos consumidores, ou seja, pelo monitoramento em tempo real torna-se a segurança alimentar mais engajada a medidas estratégicas do planejamento da vida útil daquele alimento que deve ser consumido.

Maior eficiência no gerenciamento de estoques, otimizando a reposição de produtos e reduzindo desperdícios

A falta de um controle preciso das condições ambientais dentro das despensas pode resultar em desperdício de alimentos e problemas na gestão dos estoques. Quando produtos deterioram prematuramente, há necessidade de descartá-los e substituí-los com maior frequência, o que aumenta os custos operacionais e reduz a eficiência logística.

A implementação de sensores e sistemas automatizados melhora a gestão de estoques por meio do monitoramento em tempo real, permitindo identificar quando um lote de alimentos pode estar em risco, previsão de validade e qualidade, auxiliando na organização do consumo por ordem de prioridade (FIFO - First In, First Out), pois representa uma escolha lógica para a rotação de estoques, assegurando que os produtos armazenados sejam selecionados para distribuição conforme a ordem de sua entrada na câmara fria, reduzindo desperdícios, pois os alimentos são armazenados em condições ideais e têm sua vida útil prolongada, melhoria no planejamento de compras, evitando excessos e garantindo que apenas alimentos em boas condições sejam utilizados. A otimização da reposição de produtos evita perdas desnecessárias, reduz custos operacionais e melhora a sustentabilidade do sistema de alimentação escolar, criando um ambiente seguro e controlado para o preparo da merenda escolar.

Possibilidade de automação, permitindo respostas rápidas a alterações nas condições ambientais

A integração de tecnologias inteligentes ao monitoramento ambiental da despensa escolar possibilita a automação de processos, garantindo maior eficiência na conservação dos alimentos. Sistemas automatizados podem ser programados para ajustar automaticamente as condições de temperatura e umidade dentro dos limites ideais, permitindo um envio de alerta de mudanças das variáveis locais aos responsáveis pelo armazenamento destes alimentos considerando alguns fatores que podem causar essas inadequações, incluem falhas mecânicas nos equipamentos de armazenamento que podem reduzir a durabilidade dos alimentos, variações na demanda de determinados alimentos que precisam sair da despensa, direto para o preparo por conta de temperaturas inadequadas e a falta de conhecimento dos manipuladores sobre a importância das temperaturas ideais para a conservação.

Sensores conectados ao sistema de climatização da despensa escolar podem ajustar a ventilação automaticamente sempre que a umidade ultrapassar o limite seguro, estes registros permitiram criar a série temporal para a umidade dentro da despensa escolar, gerando uma resposta rápida indica pela figura 2, no qual

houve uma queda brusca da umidade, seguida por um acúmulo de umidade evidenciado no dia 25 de fevereiro, no qual houve a inversão térmica que gerou um ambiente instável para a conservação dos alimentos, portanto o sistema pode acionar um alerta para evitar o congelamento indesejado de certos alimentos. Dados coletados pelos sensores podem ser integrados a um sistema de análise preditiva, que antecipa riscos e sugere medidas corretivas antes que os alimentos sejam comprometidos. A automação permite respostas rápidas e precisas, reduzindo o risco de falhas humanas e garantindo a manutenção de condições ideais de armazenamento, controle do estoque e rotatividade do fluxo de alimentos que são mais consumidos pelos alunos desta escola.

IV. Discussion

A análise dos dados coletados durante o monitoramento ambiental da despensa escolar da rede Amazônica de Ensino Fundamental e Médio, localizada no município de Parintins, evidenciou que as condições climáticas da região amazônica são altamente favoráveis à proliferação de fungos e à contaminação dos alimentos por micotoxinas. A temperatura elevada e a alta umidade relativa do ar demonstraram um impacto direto sobre a conservação dos alimentos armazenados, reforçando a necessidade de um controle ambiental eficaz.

A solução proposta neste estudo, baseada na implementação de um sistema de controle utilizando dissipador de calor, ventoinha, módulo Peltier, fonte de alimentação e compartimento removível para coleta de água condensada, mostrou-se viável para reduzir a umidade e manter a temperatura dentro de faixas seguras, como destaca o estudo de Niedermaeyer (2022) a vantagem deste tipo de sistema é o controle da temperatura da pastilha de Peltier, pois, uma vez que o sistema atinge a tensão desejada, ele aquecerá até o ponto estabelecido, sem demandar mais potência para alcançar a temperatura correta, tornando-se uma solução eficiente e de baixo consumo energético. O módulo Peltier destaca-se como um dispositivo térmico eficiente para estabilizar a temperatura, funcionando através da diferença de potencial elétrico que gera um gradiente de calor, removendo calor da despensa e facilitando a dissipação térmica.

A convecção ocorre devido à posição superior do módulo Peltier em relação ao compartimento refrigerado. Como o ar frio é mais denso, ele desce, enquanto o ar quente, menos denso, sobe, criando correntes de convecção. Essas correntes são intensificadas por um ventilador interno, ajudando a manter uma temperatura estável no interior do refrigerador. Este estudo indica que a ventoinha foi essencial para promover a circulação do ar e potencializar o resfriamento do dissipador de calor, reduzindo a possibilidade de superaquecimento do sistema, sendo este equipamento uma solução viável para o monitoramento e controle das variáveis locais.

Os resultados indicaram que a aplicação desses mecanismos é necessária para reduzir significativamente a umidade relativa, garantindo uma conservação mais adequada dos alimentos. Com isso, pode acarretar uma diminuição no risco de contaminação por fungos e micotoxinas, contribuindo diretamente para a segurança alimentar dos estudantes da escola.

Apesar da eficácia do sistema apontada pelos estudos mencionados, alguns desafios foram identificados. A necessidade de uma fonte de energia constante para manter o funcionamento do módulo Peltier pode representar um obstáculo em locais com infraestrutura elétrica limitada. Além disso, a manutenção periódica do sistema, especialmente a limpeza do dissipador e a remoção da água condensada, é essencial para manter a eficiência do controle ambiental.

Em comparação com soluções tradicionais, como a refrigeração convencional e o uso de desumidificadores comerciais, o sistema proposto apresenta vantagens em termos de custo e eficiência energética. No entanto, sua aplicabilidade em larga escala requer estudos adicionais para avaliar a robustez do sistema sob diferentes condições de operação.

Portanto, o presente estudo demonstrou que a integração de tecnologias de controle ambiental, como sensores, sistemas termoelétricos e mecanismos de ventilação, é uma alternativa viável e eficaz para a conservação de alimentos em ambientes escolares. A continuidade do monitoramento e a melhoria dos sistemas de automação podem otimizar ainda mais a prevenção da contaminação alimentar e garantir a qualidade dos produtos armazenados.

V. Conclusion

O presente estudo demonstrou que o monitoramento contínuo de variáveis ambientais, através da integração de tecnologias IoT, é uma estratégia promissora para a conservação de alimentos, sobretudo em ambientes com condições climáticas adversas, como as encontradas na região amazônica. Os dados coletados evidenciam que a manutenção de parâmetros ambientais adequados previne a deterioração dos alimentos, além de minimizar o risco de contaminação por micotoxinas, contribuindo de forma significativa para a segurança alimentar e a redução de perdas.

A abordagem adotada neste trabalho alia uma fundamentação teórica robusta a uma solução prática inovadora, destacando a viabilidade de soluções de baixo custo e alto desempenho energético. A utilização de sensores estrategicamente posicionados, a transmissão de dados em tempo real via plataforma Adafruit IO e a implementação de mecanismos automáticos de correção das condições ambientais, é uma grande aposta para o

avanço substancial na gestão de alimentos não perecíveis e perecíveis, e com potencial para ser adaptado a outras cadeias de frio e contextos logísticos críticos.

Entretanto, o estudo também revelou limitações, tais como a necessidade de uma fonte de energia contínua, internet com baixa latência e a exigência de manutenção periódica dos equipamentos, fatores que podem comprometer a escalabilidade e a robustez do sistema em ambientes com infraestrutura limitada. Sendo assim, para pesquisas futuras a exploração integral da automação no sistema e a integração de parâmetros preditivos para intervenções mais precisas e se possível, avaliar do desempenho do protótipo em diferentes cenários operacionais e climáticos.

Consequentemente, os achados desta pesquisa ressaltam a importância do monitoramento ambiental como ferramenta essencial na prevenção de riscos à saúde pública e na garantia da qualidade dos alimentos armazenados, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e sustentáveis no contexto da segurança alimentar.

References

- [1]. Barros, D. De M.; Ferreira Da Silva, Ap; De Moura, Df; Ramos Dos Santos Medeiros, Sm De F.; Lima Cavalcanti, Id; Luna Da Silva, Jh; De França Leite, Ar; Dos Santos, Jms; Melo, M. De A.; Costa, J. De O.; Da Silva, Gm; De Oliveira, Gb; Rocha, Ta; Da Costa, Mp; Padilha, Acb Da S.; De Oliveira Ferreira, Sa; Da Fonte, Rab Principais Técnicas De Conservação Dos Alimentos. Revista Brasileira De Desenvolvimento, [S. L.], V. 1, Pág. 806–821, 2020. Doi: 10.34117/Bjdv6n1-056. Disponível Em: <Https://Ojs.Brazilianjournals.Com.Br/Ojs/Index.Php/Brjd/Article/View/5917>. Acesso Em: 18 Mar. 2025.
- [2]. Brasil. Ministério Da Saúde. Secretaria De Vigilância Em Saúde. Departamento De Vigilância Das Doenças Transmissíveis. Manual De Rede De Frio Do Programa Nacional De Imunizações. 5. Ed. Brasília: Ministério Da Saúde, 2017.
- [3]. Baquião, A. C. Fungos E Micotoxinas Em Castanhas-Do-Brasil, Da Colheita Ao Armazenamento. 2012. Tese (Doutorado Em Biociências) – Instituto De Ciências Biomédicas, Universidade De São Paulo, São Paulo, 2012.
- [4]. El Sayed, Raghda A.; Jejur, Ali B.; Kang, Wenyi; El Demerdash, Fatma M. An Overview On The Major Mycotoxins In Food Products: Characteristics, Toxicity, And Analysis. *Journal Of Future Foods*, V. 2, N. 2, P. 91–102, 2022.
- [5]. Gava, A. J.; Silva, C. A. B.; Frias, J. R. G. Tecnologia De Alimentos: Princípios E Aplicações. São Paulo: Nobel, 2009. 512 P.
- [6]. Joseph, Wisnel; Pacheco De Souza, Adilson; Sabino, Marlus. Índices De Extremos De Temperatura Do Ar Na Amazônia Brasileira. *Confins*, V. 52, Nov. 2021. Doi: 10.4000/Confins.41520. Disponível Em: <Http://Journals.Openedition.Org/Confins/41520>. Acesso Em: 21 Abr. 2025.
- [7]. Machado, Roberto Luiz Pires. Boas Práticas De Armazenagem Na Indústria De Alimentos. Rio De Janeiro: Embrapa Agroindústria De Alimentos, 2000. 28 P. (Embrapa Agroindústria De Alimentos. Documentos, 42)
- [8]. Machado Lima, Juliana Cristina; Andrade, Vanda Maria Sales De; Braz Homci, Valéria Pereira Et Al. Sazonalidade Dos Elementos Do Clima E Sua Influência Na Serapilheira Em Uma Floresta Sucessional Na Amazônia Oriental. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, San José, V. 18, N. 43, P. 62–70, Jul./Dez. 2021. Doi: 10.18845/Rfmnk.V19i43.5810.
- [9]. Niedermaeyer, Amanda Chini. Desenvolvimento De Um Sistema De Aquecimento Controlado: Uma Aplicação Da Pastilha De Peltier. 2022. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharelado Em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Toledo, 2022.
- [10]. Paraginski, R. T. Et Al. Efeitos Da Temperatura E Da Umidade Dos Grãos De Milho. *Rev. Elet. Cient. Uergs*, V. 4, N. 3, P. 409-420, 2018.
- [11]. Pinto, U. M.; Landgraf, M.; Franco, B. D. G. M. Deterioração Microbiana Dos Alimentos. Faculdade De Ciências Farmacêuticas – Universidade De São Paulo, 2018.
- [12]. Prado, Guilherme. Contaminação De Alimentos Por Micotoxinas No Brasil E No Mundo. *Revista De Saúde Pública Do Sus/Mg*, V. 2, N. 2, P. 13-22, 2017.
- [13]. Soares, C. C.; Silva, M. M. Da; Ederli; J. A. P.; Refrigeração Termoelétrica: Explorando O Efeito Peltier Em Um Sistema Caseiro De Refrigeração. *Colloquium Exactarum*. Issn: 2178-8332, [S. L.], V. 15, N. 1, P. E234781, 2024. Disponível Em: <Https://Journal.Unoeste.Br/Index.Php/Ce/Article/View/4781>. Acesso Em: 3 Abr. 2025.
- [14]. Rocha, L. De A.; Rodrigues, Lm; Araújo, M. Da C.; Soares, T. Da C.; Barbosa Gomes, Sa; De Oliveira, Es Análise Do Controle De Temperatura De Alimentos Servidos Em Uma Unidade Universitária De Alimentação E Nutrição Da Cidade De Picos, Piauí, Brasil. Pesquisa, Sociedade E Desenvolvimento, [S. L.], V. 2, Pág. E882563, 2019. Doi: 10.33448/Rsd-V8i2.563. Disponível Em: <Https://Rsdjournal.Org/Index.Php/Rsd/Article/View/563>. Acesso Em: 17 Mar. 2025.
- [15]. Rupollo, G. Et Al. Efeito Da Umidade E Do Período De Armazenamento Hermético Na Contaminação Natural Por Fungos E A Produção De Micotoxinas Em Grãos De Aveia. Ciênc. Agrotec., Lavras, V. 30, N. 1, P. 118-125, Jan./Fev., 2006.
- [16]. Sacramento, Tailane Ramos. Importância Da Contaminação De Alimentos Por Aflatoxinas Para A Incidência De Câncer Hepático. *Recen-Revista Ciências Exatas E Naturais*, V. 18, N. 1, P. 141-169, 2016.
- [17]. Senar. Grãos: Armazenamento De Milho, Soja, Feijão E Café. Brasília: Senar, 2018.
- [18]. Shekhar, Ravikant; Raghavendra, Vinay B.; Rachitha, P. A Comprehensive Review Of Mycotoxins, Their Toxicity, And Innovative Detoxification Methods. *Toxicology Reports*, V. 14, Art. 101952, 2025.
- [19]. Spagnol, W. A. Et Al. Monitoramento Da Cadeia Do Frio: Novas Tecnologias E Recentes Avanços. *Braz. J. Food Technol.*, Campinas, V. 21, E2016069, 2018.
- [20]. Spagnol, W. A., Silveira Junior, V., Pereira, E., & Guimarães Filho, N. Redução De Perdas Nas Cadeias De Frutas E Hortaliças Pela Análise Da Vida Útil Dinâmica, *Brazilian Journal Of Food Technology*, V. 21, E2016070, P. 1-10, (2018). Doi: <Https://Doi.Org/10.1590/1981-6723.07016>. Disponível Em: <Https://Www.Scielo.Br/Bjft/A/6bs6q5qrnhwwgnd7fdhqfhk/>. Acesso Em: 17, Fev E 2025.
- [21]. Sweenwy, M. J.; Dobson, A. D. W. Mycotoxin Production By Aspergillus, Fusarium And Penicillium Species. *International Journal Of Food Microbiology*, Amsterdam, V. 43, P. 141-158, 1998.
- [22]. Taniwaki, M. H.; Frisvad, J. C.; Ferranti, L. S.; De Souza Lopes, A.; Larsen, T. O.; Fungaro, M. H. P.; Iamanka, B. T. Biodiversity Of Mycobiota Throughout The Brazil Nut Supply Chain: From Rainforest To Consumer. *Food Microbiology*, V. 61, P. 14–22, 2017. Doi: 10.1016/J.Fm.2016.08.002.
- [23]. Vasconcellos, M. A. Da S.; Melo Filho, A. B. De. Conservação De Alimentos. Recife: Edufrpe, 2010.
- [24]. Velasco, J. Et Al. Internet Of Things-Based (Iot) Inventory Monitoring Refrigerator Using Arduino Sensor Network. *Indonesian Journal Of Electrical Engineering And Computer Science*, Vol. 18, No. 1, April 2020, Pp. 508-515.