

Sistema de Monitoramento Ambiental em Tempo Real para Otimização do Processo Produtivo em uma Panificadora na Cidade de Parintins-AM

Sarah Helena Assis dos Santos¹, Regiane Prata de Matos², Francisnyo Tavares de Oliveira³, Daniel Andrade Cunha⁴, Marzo Queiróz dos Santos⁵, Sandro Breval Santiago⁶.

^{1,2,3,4,5}(Pós- Graduação em Processos Produtivos Inteligentes, Departamento de Física, Universidade do Estado do Amazonas, Brasil)

⁶ (Dr. Em Administração, Universidade Federal do Amazonas, Brasil)

Resumo:

Antecedentes: Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de monitoramento em tempo real de temperatura e umidade em uma panificadora na cidade de Parintins-AM, utilizando o sensor DHT11 aliado ao microcontrolador ESP32.

Materiais e Métodos: A proposta busca responder as necessidades locais do setor de panificação, marcado pelo clima quente e úmido da região Norte, que afeta diretamente a conservação de insumos e a qualidade do pão. O protótipo foi construído com base em conceitos de Internet das Coisas (IoT), possibilitando tanto o registro online, com visualização em dashboards.

Resultados: Os resultados obtidos indicaram desempenho satisfatório na coleta, transmissão e análise de dados ambientais, destacando o potencial do sistema para otimizar processos produtivos, reduzir desperdícios e assegurar maior padronização na fabricação de pães. Assim, a integração de sensores de baixo custo e tecnologias de IoT mostra-se uma solução eficiente, acessível e adaptada às condições da região amazônica.

Conclusão: Além de favorecer a competitividade das empresas locais, o sistema desenvolvido atende as necessidades de segurança alimentar e de melhoria contínua da qualidade, configurando-se como uma alternativa viável e adaptada às condições específicas de Parintins e de outras localidades com características climáticas semelhantes.

Palavra-chave: Panificação; Monitoramento em tempo real; DHT11; IoT; Parintins- AM.

Date of Submission: 24-11-2025

Date of Acceptance: 08-12-2025

I. Introdução

A produção de pães é um processo sensível às condições ambientais, especialmente em regiões tropicais como Parintins, no Amazonas, que apresentam altas temperaturas e níveis elevados de umidade ao longo do ano. Essas condições impactam diretamente a fermentação da massa, a estrutura e crocância do pão assado, além da estabilidade e higiene durante o armazenamento temporário dos produtos antes do consumo final. Segundo Costa [2], a variação de temperatura e umidade é um dos principais fatores que afetam a qualidade dos produtos de panificação, podendo gerar perdas significativas e variações qualitativas indesejadas. A ausência de sistemas automatizados de monitoramento e controle ambiental nas padarias locais contribui para o uso de métodos manuais e subjetivos, o que aumenta o risco de erros no processo produtivo, além de desperdício de matérias-primas, como o trigo. Diante desse cenário, a incorporação de tecnologias de monitoramento inteligente, como sensores de temperatura e umidade ligados a microcontroladores, tem se mostrado uma alternativa eficaz para garantir a padronização dos produtos e reduzir o desperdício Melesse [9]. O sensor DHT11, integrado ao microcontrolador ESP32, possibilita o monitoramento contínuo e preciso das condições ambientais, promovendo uma maior estabilidade durante as fases críticas da fabricação do pão Alves [1]. Tecnologias digitais em padarias contribui para a otimização dos processos produtivos, assegurando a qualidade constante do produto, a eficiência na fermentação e a conservação adequada da massa, além de diminuir o desperdício e melhorar a sustentabilidade do negócio Melesse [9]. Dessa forma, a presente pesquisa contribui para o aprimoramento dos processos produtivos no setor de panificação, por meio de três eixos principais: primeiro o desenvolvimento de um protótipo de monitoramento ambiental baseado no uso do sensor DHT11 integrado ao microcontrolador ESP32, adaptado às condições de uma panificadora situada em clima equatorial; segundo a coleta e análise sistemática de dados

referentes à temperatura e à umidade relativa do ar durante as diferentes etapas do processo de panificação incluindo a fermentação, a modelagem e o armazenamento prévio à cocção; e terceiro a avaliação dos impactos da adoção desse sistema sobre a variabilidade do produto final, especialmente quanto à uniformidade da massa, à crocância e à estrutura do pão, bem como na mitigação de perdas de matéria-prima. Com isso, a pesquisa demonstrou resultados significativos, contribuindo com subsídios técnicos e científicos que favorecem a padronização dos processos produtivos, a elevação dos padrões de qualidade do produto, a redução do desperdício de trigo e a otimização da eficiência operacional na panificadora em estudo. E ser o reflexo de referência e estímulo para futuras pesquisas voltadas à aplicação de tecnologias inteligentes no setor de panificação.

II. Revisão Bibliográfica

Origem do Pão

A história do pão remonta aos primórdios da agricultura, quando os cereais passaram a ser cultivados e transformados em um alimento básico, essencial para o sustento do ser humano. De acordo com Magalhães et al. [8], “o pão francês se consolidou no Brasil como o principal produto da panificação, adaptando-se ao gosto popular e tornando-se parte essencial da dieta cotidiana”. Esse processo de adaptação, ao longo dos séculos, não se deu apenas em termos de sabor, mas também de técnicas de preparação e fermentação, como sinalizar Ferreira [5], que a importância dos microrganismos fermentativos na evolução do processo, sendo esses responsáveis por conferir textura e volume ao pão. A difusão do pão no Brasil, inicialmente associado à cultura europeia, foi profundamente influenciada pela colonização e pelos processos de globalização alimentar, como observa Souza [14]. O pão, que antes fazia parte da dieta de regiões europeias, foi incorporado à alimentação brasileira, sendo adaptado às particularidades locais. Gonçalves [6] acrescenta que, embora o pão não seja originário da Amazônia, ele passou a ser parte essencial da vida social e familiar na região, funcionando como um “símbolo de partilha e convivência social”.

Evolução das Técnicas de Panificação

Está intimamente ligada ao progresso social e às inovações tecnológicas. Nascimento [10] aponta que, à medida que a demanda pelo pão cresceu, as panificadoras passaram a adotar tecnologias avançadas, como softwares e sistemas de gestão, capazes de otimizar os processos de produção e reduzir falhas. Para Ferreira [5], a inovação científica tem sido essencial para o desenvolvimento de fermentos mais eficientes, além do controle rigoroso de variáveis ambientais, como temperatura e umidade, que afetam diretamente o processo de fermentação. Em um cenário mais contemporâneo, Silva [12] observa que a modernização das padarias, mesmo nas pequenas e médias empresas, tem sido possível com o uso de equipamentos e processos automatizados, que não só aumentam a produtividade como também garantem maior padronização no produto. Magalhães et al. [8] reforçam que, no Brasil, a padronização do pão francês foi resultado direto desses avanços técnicos, que possibilitaram a estabilidade na oferta do produto e a manutenção de suas qualidades sensoriais. Por sua vez, Souza [14] aponta que a inovação não se limita à adoção de novos equipamentos, mas também à implementação de práticas de monitoramento em tempo real das variáveis críticas do processo de produção, utilizando sensores de temperatura e umidade para melhorar a qualidade e a eficiência da panificação.

Inovação Tecnológica e Automação na Panificação

O setor da panificação tem passado por transformações significativas com o avanço da Indústria 4.0, que integra sensores, softwares e sistemas de monitoramento em tempo real para aumentar a eficiência e reduzir falhas. Como destacam Santos e Oliveira [11], o uso dessas tecnologias não está restrito às grandes indústrias, mas também pode ser incorporado por pequenas padarias, permitindo maior controle do processo produtivo e melhoria da qualidade dos produtos. Um dos principais desafios enfrentados pelas padarias é o controle de variáveis ambientais, como temperatura e umidade, que influenciam diretamente a fermentação e, por consequência, o volume, a textura e o sabor do pão. De acordo com Lima et al. [7], a utilização de sensores de baixo custo, como o DHT11, em conjunto com microcontroladores como o Arduino e o ESP32, representa uma solução viável para o monitoramento das condições ambientais em tempo real, garantindo padronização da produção. Além de possibilitar maior precisão, essas inovações contribuem para a sustentabilidade, já que evitam desperdícios de insumos e otimizam o uso de energia. Nesse sentido, Silva e Rocha [13] reforçam que a automação em pequenos estabelecimentos alimentícios constitui um caminho promissor para modernizar o setor, aumentar sua competitividade e, ao mesmo tempo, preservar características artesanais da panificação. Assim, observa-se que a inovação tecnológica aplicada à panificação oferece novas perspectivas para a região amazônica, pois alia tradição e modernidade, tornando-se um recurso estratégico para pequenas padarias que buscam aumentar sua produtividade sem abrir mão da qualidade e da identidade cultural do pão.

III. Metodologia

A pesquisa caracteriza-se como um estudo aplicado e de caráter experimental, voltado a montagem e à avaliação de um protótipo de monitoramento ambiental em processos de panificação, tendo em vista o clima quente e úmido. O sistema foi construído a partir da utilização de microcontroladores ESP32 (figura 1), responsável pela coleta e transmissão dos dados, em conjunto com sensores DHT11 (figura 2) para medição de temperatura e umidade.



Figura 1- Microcontrolador ESP32
Fonte: Autoria própria.



Figura 2- Sensor DHT11
Fonte: Autoria própria.

O sensor DHT11 é capaz de medir a temperatura e a umidade relativa do ar, sendo amplamente utilizado em aplicações voltadas à Internet das Coisas. Ele conta com um microcontrolador de 8 bits de alto desempenho, que garante respostas rápidas e confiáveis, aliado a um baixo consumo de energia. Além disso, seu sinal pode ser transmitido por cabos de até 20 metros de comprimento. Electronics [4].

A montagem ocorreu em uma protoboard (figura 3), com a programação realizada na plataforma Arduino IDE, em linguagem Phyton (figura 4), permitindo leituras contínuas das variáveis ambientais e o envio das informações. Esse monitoramento e controle podem ser feitos a partir de uma dashboard criada no Adafruit (figura 5).

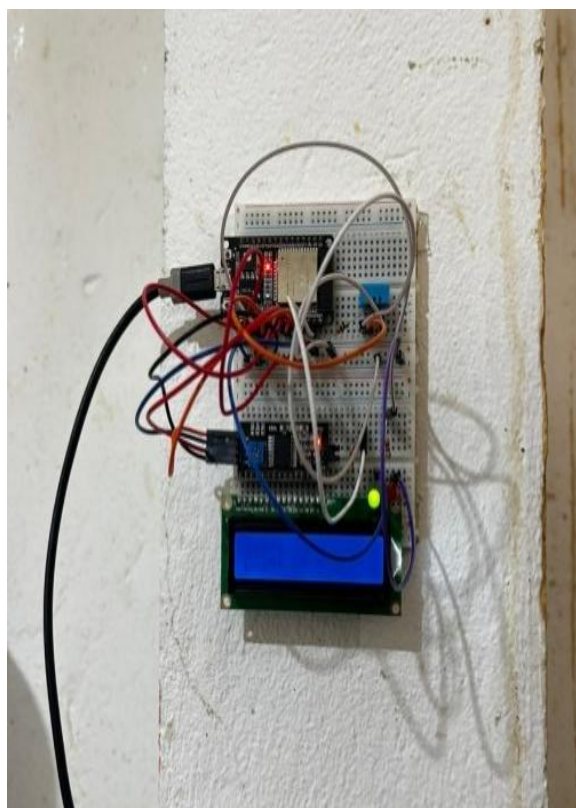


Figura 3- Protótipo montado
Fonte: Autoria própria.

```
1 #include <WiFi.h>
2 #include <WiFiManager.h>
3 #include "AdafruitIO_WiFi.h"
4 #include "DHT.h"
5 #include <Wire.h>
6 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
7
8 // ----- CONFIGURAÇÕES -----
9 #define IO_USERNAME "magdane076"
10 #define IO_KEY "aio_PmPX00kgOGNk3hoyfWmqK0vepos"
11
12 #define DHTPIN 4 // GPIO4
13 #define DHTTYPE DHT11
14 #define LED_VERDE 22 // GPIO22
15 #define LED_VERMELHO 2 // GPIO2
16
17 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
18 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Use 0x3F se 0x27 não funcionar
19
20 // Conexão Adafruit IO (SSID e senha ficam vazios pois será usado WiFiManager)
21 AdafruitIO_WiFi io(IO_USERNAME, IO_KEY, "", "");
22
23 // Feeds do Adafruit IO
24 AdafruitIO_Feed *temperatura = io.feed("temp1");
25 AdafruitIO_Feed *umidade = io.feed("umid1");
```

Figura 4- Código.
Fonte: Autoria própria.

Cunha [3]. Além do uso do dashboard do Adafruit IO, foi desenvolvida uma interface personalizada para visualização dos dados. Também foi utilizado Python em conjunto com a biblioteca Dash, que possibilitou a criação de um dashboard interativo capaz de consumir as informações diretamente do Adafruit IO por meio da API. Esse painel pode ser hospedado em um servidor web, permitindo acesso aos dados de qualquer dispositivo conectado à internet. (figura 6).

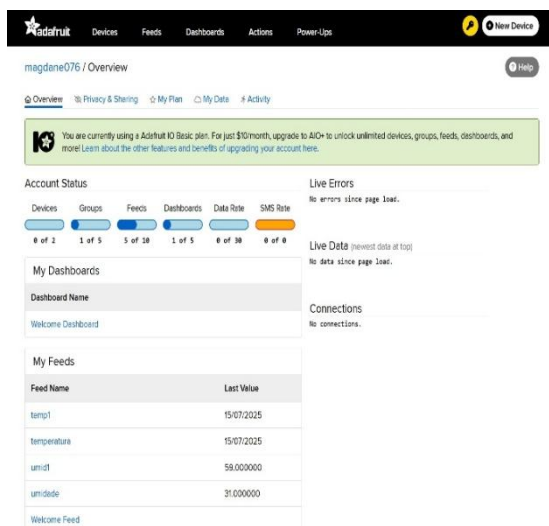


Figura 5- Adafruit.

Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 6- Interface personalizada.

Fonte: Autoria própria.

O sistema completo possui a seguinte lista de componentes descritos na tabela nº1.

Tabela nº 1- Listagem de componentes utilizados na construção do Sistema.

1	Sensor de temperatura e umidade DHT11
2	Microcontrolador ESP32
3	Jumpers
4	Protoboard
5	Carregador de celular (fonte)
6	Display LCD
7	Módulo adaptador I2c
9	Led
8	Resistor axial

O protótipo foi instalado em dois em ambiente de uma panificadora na cidade de Parintins-AM, possibilitando a análise da precisão das medições, da estabilidade da transmissão e do tempo de resposta diante das variações ambientais. Os arquivos salvos foram posteriormente organizados e analisados, permitindo a verificação detalhada das informações coletadas. A validação do sistema ocorreu pela comparação entre os registros online e offline, assegurando a confiabilidade dos dados e destacando a relevância do monitoramento em tempo real para a redução de falhas no processo produtivo

IV. Discussão e Resultados

Com base nessa perspectiva, a presente pesquisa foi implementada em uma panificadora localizada na Cidade de Parintins, no Estado do Amazonas, com o intuito de otimizar a qualidade dos produtos e fortalecer as condições de segurança alimentar por meio da aplicação de tecnologias de monitoramento ambiental. A implementação do sistema, fundamentada no uso do sensor DHT11 integrado ao microcontrolador ESP32, permitiu o acompanhamento contínuo e preciso da temperatura e da umidade relativa do ar, variáveis que exercem influência direta sobre o processo de fermentação da massa e, consequentemente, sobre as características sensoriais e estruturais do pão Costa [2].

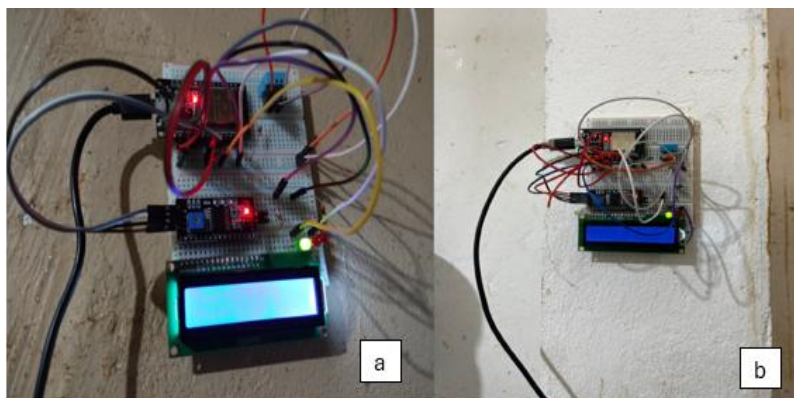


Figura 7- Sensores 1 e 2

Fonte: Autoria própria.

O monitoramento ambiental na panificadora foi conduzido de forma sistemática, com o objetivo de coletar dados precisos sobre as condições internas dos diferentes setores produtivos.

Conforme apresentado na Figura 7, os sensores utilizados no estudo estão identificados pelas letras “a” e “b”, correspondendo, respectivamente, aos Sensores 1 e 2.

O Sensor 1 (letra “a”) foi o primeiro a ser instalado, no dia 12 de julho de 2025, realizando o monitoramento contínuo durante 58 dias. Este sensor foi posicionado na sala de produção de massa, fermentação e modelagem, denominada Zona 1, com a finalidade de registrar as variações ambientais nas etapas iniciais do processo produtivo.

Já o Sensor 2 (letra “b”) iniciou seu monitoramento em 15 de julho de 2025, totalizando 55 dias de coleta de dados. Esse equipamento foi instalado na sala de forno e estocagem, denominada como Zona 2, permitindo avaliar as condições ambientais específicas dessa etapa, caracterizada por maiores variações térmicas e de umidade.

Dessa forma, o monitoramento ambiental nas duas zonas possibilitou uma análise comparativa detalhada das condições operacionais em diferentes ambientes da panificadora, contribuindo para a identificação de fatores que influenciam diretamente a qualidade do processo produtivo e a eficiência energética.

A escolha desses locais fundamenta na relevância que cada um deles exerce sobre a qualidade do produto e na necessidade de monitoramento contínuo das variáveis ambientais. Pontos críticos da panificadora definidos como Zona 1 e Zona 2, de acordo com as características funcionais e térmicas do ambiente produtivo. Como observa-se na figura 8.



Figura 8- Instalação estratégica (Zona 1 e Zona 2).

Fonte: Autoria própria.

A Zona 1 representada pela letra a) compreende a sala destinada à produção, fermentação e modelagem da massa, onde se concentram as principais máquinas e equipamentos utilizados na preparação do pão. Trata-se de um ambiente em que a variação de temperatura e umidade exerce influência direta sobre o desempenho das leveduras, a textura da massa e a uniformidade do processo de fermentação, tornando indispensável o acompanhamento contínuo dessas variáveis. A Zona 2 representada pela letra b), por sua vez, abrange a sala onde estão localizados o forno e o espaço destinado à estocagem temporária dos produtos. Essa área apresenta maior

exposição ao calor e à variação de umidade, especialmente durante a fase de cocção e o subsequente resfriamento dos pães. O monitoramento nessa zona visa avaliar a dissipação térmica proveniente do forno, bem como garantir condições adequadas de conservação dos produtos antes da distribuição.

Os dois dispositivos foram posicionados estrategicamente no canto direito como é visível na figura 8, de modo a otimizar a captação dos dados ambientais e evitar interferências diretas provenientes das fontes de calor e umidade existentes nas áreas produtivas, além também de possuir energia para a conexão do cabo de distribuição USB. Vale ressaltar que a área produtiva da panificadora é composta por apenas dois cômodos principais de produção, o que reforçou a necessidade de uma segmentação criteriosa do ambiente em zonas de monitoramento, de modo a obter dados precisos sobre o comportamento térmico e higrométrico do espaço. Essa divisão permite uma análise mais detalhada das condições ambientais.

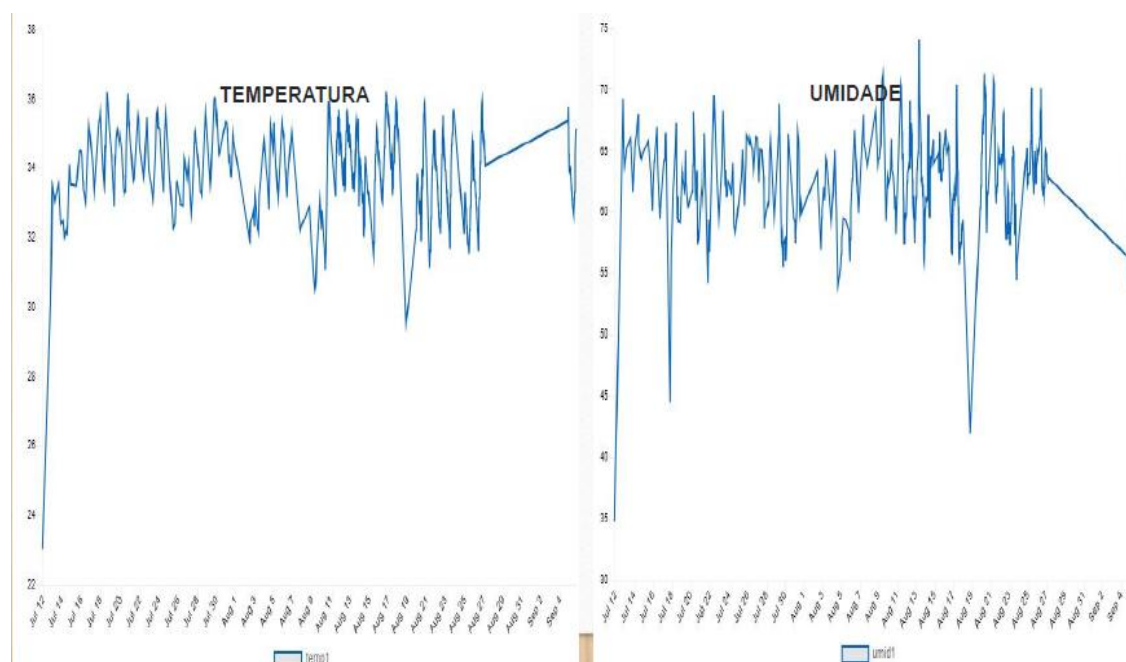


Figura 9- Dados obtidos da Zona 1

Fonte: Autoria própria.

A figura 9, corresponde à área de produção, fermentação e modelagem da massa, a análise dos registros revelou uma temperatura mínima de 30,14 °C, obtida em 12/07/2025, e uma temperatura máxima de 36,44 °C, registrada em 04/08/2025. Os registros de umidade relativa do ar apresentaram variações significativas ao longo do período de monitoramento. Obteve uma umidade mínima de 42 %, registrada em 18/08/2025, e uma umidade máxima de 74,04 % registrada no dia 13/08/2025, refletindo a amplitude das condições ambientais enfrentadas durante as atividades produtivas. Esses valores mostram a variabilidade térmica típica dessa etapa do processo produtivo, na qual a operação de máquinas e a atividade das leveduras influenciam diretamente o comportamento da massa e, consequentemente, a qualidade do produto. A presença de níveis de umidade elevados ou reduzidos pode comprometer a uniformidade da massa, afetando a consistência, a elasticidade e a qualidade sensorial do produto.

De acordo com a literatura técnica, a faixa ideal de temperatura para a fermentação da massa situa-se entre 24 °C e 28 °C, enquanto a umidade relativa do ambiente deve permanecer entre 75 % e 85 %, de modo a evitar o ressecamento da massa e garantir a atividade adequada das leveduras durante o processo fermentativo.

Os resultados obtidos na Zona 1 pelo sistema de monitoramento, contudo, revelaram temperaturas variando entre (30°C a 36°C) e níveis de umidade (42% a 74%) Assim, infere-se que, durante a etapa de fermentação, as condições ambientais da Zona 1 não se encontram plenamente adequadas aos padrões técnicos recomendados. Por outro lado, quando se considera a etapa de modelagem a umidade recomendada situa-se entre 60 % e 75 %, os dados obtidos demonstram maior compatibilidade com as condições desejáveis. A umidade registrada na Zona 1 manteve-se dentro dessa faixa, o que contribui para a maleabilidade da massa e facilita o processo de modelagem, evitando o ressecamento e a formação de fissuras superficiais. Entretanto, a temperatura elevada ainda representa um fator de risco, uma vez que valores acima do ideal podem levar à fermentação acelerada, resultando em massa excessivamente mole, pegajosa e com perda de estrutura.

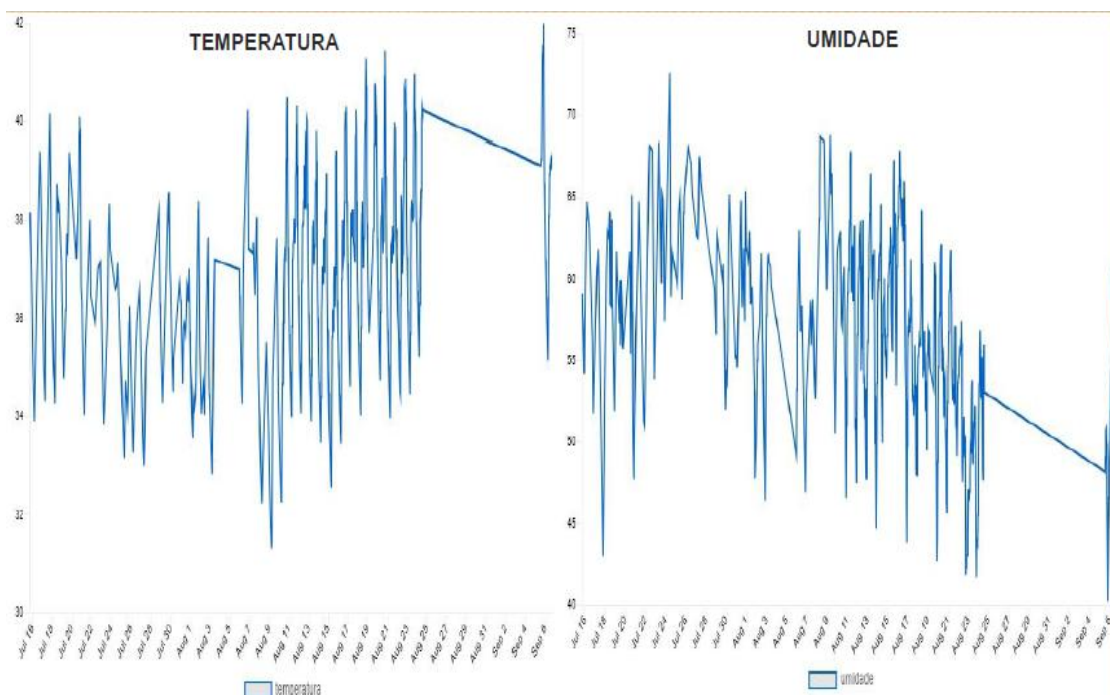


Figura 10- Dados obtidos da Zona 2.

Fonte: Autoria própria.

A figura 10, corresponde à área do forno e ao espaço de estocagem dos produtos, os registros de temperatura apresentaram maior variabilidade em relação à Zona 1. Os dados indicam uma temperatura mínima de 31,31 °C, registrada em 09/08/2025, e uma temperatura máxima de 41,5 °C, observada em 05/09/2025, durante o período de maior atividade do forno. Os registros de umidade relativa do ambiente evidenciaram variações significativas ao longo do período de monitoramento. Observou-se uma umidade mínima de 40,29 %, registrada em 18/08/2025, e uma umidade máxima de 72,58 %, verificada em 24/07/2025, demonstrando a amplitude das condições ambientais presentes nesta zona. A faixa ideal de temperatura para o ambiente de forno situa-se entre 25 °C e 30 °C, com umidade relativa do ambiente entre 50 % e 60 %, valores que visam garantir a estabilidade térmica necessária à finalização do produto e à manutenção da segurança alimentar. Já para a etapa de estocagem, recomenda-se uma temperatura entre 20 °C e 25 °C e umidade relativa igualmente entre 50 % e 60 %, de modo a evitar tanto o desenvolvimento de mofo e fungos (em casos de alta umidade) quanto o ressecamento excessivo dos pães (em situações de baixa umidade). Todavia, os dados obtidos pelo sistema de monitoramento indicaram temperaturas variando de 30 °C a 42 °C e umidades relativas entre 40 % e 71 %, revelando que o ambiente da Zona 2 encontra-se totalmente fora da faixa ideal.

Essas oscilações são particularmente relevantes para a conservação e estabilidade dos produtos, uma vez que níveis inadequados de umidade podem afetar a textura, crocância e vida útil do pão. O controle da umidade na Zona 2 é essencial para reduzir a proliferação de microrganismos e assegurar a integridade dos produtos durante o armazenamento temporário. Essa amplitude térmica evidencia as condições críticas desse ambiente, no qual o calor gerado pelo forno e as características do armazenamento influenciam diretamente a estabilidade do produto e a conservação adequada dos pães. Além dos impactos sobre os produtos, as condições ambientais observadas também representam um fator de desconforto térmico para os colaboradores que atuam nesse setor. A exposição prolongada a temperaturas elevadas pode acarretar fadiga térmica, redução da produtividade e aumento do risco de acidentes ocupacionais.

Conforme ilustrado nas Figuras 9 e 10, observa-se certa disparidade nos dados coletados entre as duas zonas, evidenciando diferenças nas condições ambientais e os processos de produção ao longo do tempo. Dessa forma, a disposição dos sensores em tais pontos estratégicos permitiu a coleta de dados representativos de todo o ambiente produtivo, contribuindo para uma análise mais precisa e para a otimização das condições de fabricação e conservação dos pães.



Figura 11- Interface personalizada no dashboard
Fonte: Autoria própria.

Uma interface personalizada do dashboard foi desenvolvida com o objetivo de aprimorar a visualização e a interpretação dos dados coletados pelos Sensores 1 e 2. O ambiente foi projetado de forma organizada, interativa e visualmente atrativa, apresentando elementos gráficos coloridos e ícones temáticos, como o desenho de um pão, que identifica a aplicação específica do sistema na panificadora X.

A interface é composta por quatro seções principais, cada uma com uma função específica:

1. Sensores: apresenta, de forma geral, os dados atualizados de cada sensor, permitindo uma visão consolidada do monitoramento ambiental;
2. Configurações: área destinada ao gerenciamento de acesso, onde são inseridos o login e a senha do usuário;
3. Gráficos: seção voltada à representação visual dos dados, possibilitando a análise dinâmica das variáveis de temperatura e umidade ao longo do tempo;
4. Exportar dados: módulo que oferece uma análise mais detalhada, incluindo estatísticas descritivas, comparações entre os sensores e previsões baseadas nos dados históricos.

Na Figura 11, exemplifica-se a funcionalidade do dashboard com os dados coletados no dia 29 de julho de 2025, em que o Sensor 1 registrou uma temperatura de 36,2 °C e umidade relativa de 56%, enquanto o Sensor 2 apresentou temperatura de 39 °C e umidade de 55%.

Além disso, o sistema permite a exportação automática dos dados em formato CSV, compatível com plataformas como Microsoft Excel, Google Sheets e outros softwares de análise, garantindo praticidade e integridade na gestão das informações. A atualização e o salvamento dos dados ocorrem de forma automática a cada nova leitura, o que torna o dashboard um recurso eficiente de apoio ao monitoramento ambiental, oferecendo uma visualização mais organizada, acessível e precisa dos resultados obtidos. Além disso, o monitoramento permitiu identificar com maior exatidão os níveis de umidade relativa do ambiente, variável de extrema relevância tanto para o processo produtivo quanto para o conforto térmico dos colaboradores. Adicionalmente, os resultados indicam a necessidade de aprimoramento dos sistemas de refrigeração e ventilação, de modo a garantir condições ambientais mais estáveis e confortáveis tanto para os funcionários quanto para as etapas produtivas. Assim, o monitoramento ambiental mostrou-se uma ferramenta essencial de diagnóstico e gestão, contribuindo para a melhoria do ambiente de trabalho, a otimização dos processos produtivos e a redução de perdas, alinhando-se aos princípios da eficiência energética e da qualidade industrial. A ausência de controle ambiental adequado acarreta variações significativas nesses parâmetros, comprometendo não apenas o desenvolvimento da massa, mas também a conservação dos pães após a cocção.

V. Conclusão

O presente estudo enfatiza a relevância e a aplicabilidade da tecnologia no contexto da panificação, especialmente em regiões de clima equatorial, como a cidade de Parintins-AM. A implementação do sistema de monitoramento ambiental demonstrou ser uma alternativa eficiente, acessível e tecnicamente viável, permitindo a coleta e análise contínua de dados de temperatura e umidade em tempo real. A partir dos resultados obtidos, foi

possível identificar pontos críticos no processo produtivo, sobretudo nas condições ambientais das zonas de produção e estocagem, que impactam diretamente na qualidade, padronização e conservação dos produtos panificados. O projeto desenvolvido contribui para o avanço da Indústria 4.0 no setor alimentício, integrando sensores e sistemas inteligentes de monitoramento ao processo tradicional de fabricação de pães. Tal iniciativa demonstra que o uso de tecnologias digitais pode promover ganhos significativos na eficiência produtiva, redução de perdas de matéria-prima, controle de qualidade e segurança alimentar.

Além disso, esta pesquisa serve como inspiração e base para o desenvolvimento de novos estudos científicos, incentivando a adoção de soluções tecnológicas em pequenas e médias panificadoras que enfrentam desafios semelhantes. A simplicidade de instalação e operação do sistema, aliada ao seu baixo custo, reforça seu potencial de aplicação em diferentes escalas de produção e contextos socioeconômicos. Como perspectivas futuras, propõe-se o aperfeiçoamento do sistema de monitoramento por meio da integração com mecanismos automatizados de ventilação e refrigeração, visando estabilizar as condições ambientais de forma autônoma; o desenvolvimento de modelos preditivos para otimização das etapas de fermentação e cozimento; e a expansão do monitoramento para outros parâmetros, como a umidade interna da massa. Conclui-se que o emprego de tecnologias emergentes no setor da panificação representa não apenas uma inovação operacional, mas também um marco no avanço da produção sustentável e inteligente, alinhada aos princípios da Indústria 4.0 e às demandas contemporâneas por eficiência, qualidade e segurança nos alimentos.

VI. Financiamento

Os autores agradecem ao (CITS.Amazonas) pelo apoio financeiro para a especialização em Processos Produtivos Inteligentes (PPI) e à Agência de Inovação da Universidade do Estado do Amazonas (AIN/UEA).

Referências

- [1]. Alves, Yuri de Araújo. Sistema para o Monitoramento e Controle do Processo de Fermentação de Massa Comestível Caseira Utilizando a Plataforma Arduino IoT Cloud. Instituto Federal Catarinense - Campus Luzerna. v. 5 n. 2, 2023.
- [2]. Costa, Francisco dos Santos. Percepções Matemáticas No Processo De Produção Do Pão Manual E Suas Aplicações Didáticas. 2024. Repositório Institucional da Universidade do Estado do Amazonas.
- [3]. Cunha, Daniel Andrade et al. Sistema IoT de monitoramento de temperatura e umidade em colmeias de abelhas sem ferrão. *Brazilian Journal of Development*, v. 11, n. 4, p. e79169-e79169, 2025.
- [4]. Electronics, Mouser. Dht11 humidity temperature sensor. Eletrônica OSEPP:HUMI-01, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- [5]. Ferreira, Pedro Vinícius Duarte. Desenvolvimento e análise de pães: estudo aplicado à panificação. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Alimentos) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2022.
- [6]. Gonçalves, Ana Clara. A importância da panificação no setor alimentício: um estudo em empresas da região amazônica. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Estado do Amazonas, Parintins, 2022.
- [7]. Lima, a. C.; Santos, m. R.; Pereira, D. S. Aplicação de sensores na indústria de alimentos: monitoramento de temperatura e umidade no processo de panificação. *Revista Brasileira de Inovação Tecnológica*, v. 9, n. 2, p. 55-67, 2022.
- [8]. Magalhães, C. S.; Lima, J. R.; Oliveira, R. P.; Santos, A. L. Produção do pão francês: estudo de caso em uma pequena empresa. *Revista Científica de Ciências Agrárias*, Parintins, v. 4, n. 2, p. 1-10, 2023.
- [9]. Melesse, Tsega Y.; Orrù, Pier Francesco. A revolução digital no setor da panificação: Inovações, desafios e oportunidades da Indústria 4.0. *Alimentos*, v. 14, n. 3, p. 526, 2025.
- [10]. Nascimento, Ricardo do. Tecnologia da panificação: aplicação do conhecimento em sistemas de software. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Sistemas de Informação) – Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2020.
- [11]. Santos, J. P.; Oliveira, R. L. Indústria 4.0 e panificação: perspectivas para pequenas empresas. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 7, n. 1, p. 23-35, 2021.
- [12]. Silva, Fabiane. Gestão e modernização em pequenas padarias: estudo em Parintins-AM. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Administração) – Universidade do Estado do Amazonas, Parintins, 2023.
- [13]. Silva, F. T.; Rocha, L. M. Automação de processos em padarias artesanais: desafios e possibilidades. *Revista Ciência e Sociedade*, v. 5, n. 3, p. 41-52, 2020.
- [14]. Souza, Arilson Moreira de. A história e a evolução do pão: aspectos culturais e técnicos. *Revista Científica Multidisciplinar*, Manaus, v. 3, n. 1, p. 45-58, 2020.