

Geovani Rodrigues Yamaba

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE
QUALIDADE DA SEIVA EXTRAÍDA DA FLOR
DO COQUEIRO PARA PRODUÇÃO DE
AÇÚCAR DE COCO**

São Paulo, SP

2023

Geovani Rodrigues Yamaba

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA
SEIVA EXTRAÍDA DA FLOR DO COQUEIRO PARA
PRODUÇÃO DE AÇÚCAR DE COCO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Departamento de Engenharia de Computação
e Sistemas Digitais da Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Engenheiro.

Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica

Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais (PCS)

Orientador: Profa. Dra. Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho

São Paulo, SP

2023

Gerar a ficha catalográfica em <https://www.poli.usp.br/bibliotecas/servicos/catalogacao-na-publicacao>
Salvar o pdf e incluir na monografia

Agradecimentos

À minha família, meus pais e irmãos, por toda ajuda e todos incentivos durante essa jornada.

À minha orientadora, Professora Doutora Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho, por todo ensino e apoio durante o desenvolvimento desse projeto.

À Mombora, em especial à Kazumi e à Letícia, por todas discussões e ajudas a todos momentos.

À meus amigos, que tornaram essa caminhada mais fácil, em especial ao João e ao Guedes.

Especialmente, à Natasha, que tornou todos desafios mais leves e me ensinou a ser melhor a cada dia.

Resumo

Este projeto buscou o desenvolvimento de um protótipo de coleta de dados e monitoramento de qualidade da extração de seiva da flor do coqueiro visando obter um maior entendimento do processo de fermentação desse material, para eventualmente auxiliar na produção em escala do açúcar de coco no Brasil, para fins comerciais, buscando aumentar a eficiência operacional e o controle de qualidade. O projeto foi trabalhado desde discussões sobre o processo produtivo e seus desafios, até a obtenção de resultados e conclusões gerais e definições das perspectivas de continuidade. O sistema desenvolvido se constitui de sensores de pH, temperatura, umidade e luminosidade que, com auxílio da tecnologia de comunicação LoRa e o uso de microcontroladores da classe ESP32, permitem uma conexão remota a um servidor web, que permite o armazenamento desses dados e uma visualização dos mesmos em tempo real. Após a execução de diversos testes com o sistema desenvolvido, foram trabalhadas diversas análises, se baseando na ajustes de funções sigmóide às curvas de fermentação obtidas, permitindo a verificação de padrões de comportamento entre os parâmetros estudados e a obtenção de conclusões valiosas para o direcionamento de otimizações produtivas.

Palavras-chave: Internet da Coisas. LoRa. ESP32. Açúcar de coco. Fermentação.

Abstract

This project aimed at developing a prototype for data collection and quality monitoring of sap extraction from coconut flowers, with the goal of gaining a deeper understanding of the fermentation process of this material. The ultimate objective is to assist in the large-scale production of coconut sugar in Brazil for commercial purposes, aiming to enhance operational efficiency and quality control. The project has progressed from basic discussions about the production process and its challenges to obtaining results and overall conclusions, including defining prospects for continuation. The developed system comprises pH, temperature, humidity, and luminosity sensors, which, aided by LoRa communication technology and the use of ESP32 microcontrollers, enable remote connection to a web server. This connection allows for data storage and real-time visualization. Following various tests with the developed system, numerous analyses were conducted, involving the fitting of sigmoid functions to fermentation curves. This facilitated the identification of behavioral patterns among the studied parameters and led to valuable conclusions for guiding productive optimizations.

Keywords: Internet of Things. LoRa. ESP32. Coconut Sugar. Fermentation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Amostra de açúcar de coco com fragmento de galho e fragmento plástico registrada pela Mombora	14
Figura 2 – Foto de uma coleta real de seiva	14
Figura 3 – Coleta da seiva, com sacos plásticos	18
Figura 4 – Evaporação da seiva - Imagem de (PHILIPPINE NATIONAL STANDARD, 2010)	18
Figura 5 – Processo de cristalização - Imagem de (PHILIPPINE NATIONAL STANDARD, 2010)	19
Figura 6 – Gráfico sigmoide - Imagem de (WEISSTEIN, 2023)	21
Figura 7 – Fluxograma do desenvolvimento do projeto	24
Figura 8 – Arquitetura geral do projeto	28
Figura 9 – Placa de desenvolvimento ESP32 Devkit v1	29
Figura 10 – Módulo SX1278	30
Figura 11 – Sensor Ph4502c e eletrodo	31
Figura 12 – Soluções de calibração pH = 4 e pH = 7 e solução de cloreto de potássio	32
Figura 13 – Sensor DHT11	32
Figura 14 – Sensor BH1750	33
Figura 15 – Fluxograma com a estrutura lógica dos softwares de cada dispositivo	34
Figura 16 – Criação do pacote a ser enviado no módulo de sensoriamento	35
Figura 17 – Leitura do pacote e separação dos dados no receptor	35
Figura 18 – Visualização dos dados obtidos	36
Figura 19 – Testes iniciais	39
Figura 20 – Resultados após a repetição do teste com a madeira de jaca	39
Figura 21 – Inclusão dos testes a 25°C	40
Figura 22 – Imagem de satélite da fazenda, para obtenção da distância aproximada entre os equipamentos	40
Figura 23 – Início do teste	41
Figura 24 – Fim do teste	41
Figura 25 – Resultado do teste realizado na fazenda	42
Figura 26 – Ajuste da sigmoide no teste a 30° C com incidência de luz	43
Figura 27 – Ajuste da sigmoide no teste a 30° C sem incidência de luz	43
Figura 28 – Ajuste da sigmoide no teste a 30° C com madeira de jaca e sem incidência de luz	44
Figura 29 – Ajuste da sigmoide no teste a 30° C com madeira de jaca e com incidência de luz	44
Figura 30 – Ajuste da sigmoide no teste a 25° C com incidência de luz	45

Figura 31 – Ajuste da sigmoide no teste a 25° C sem incidência de luz	45
Figura 32 – Ajuste da sigmoide no teste a 20° C com incidência de luz	46
Figura 33 – Ajuste da sigmoide no teste a 20° C sem incidência de luz	46
Figura 34 – Ajuste da sigmoide no teste a 20° C com madeira de jaca sem incidência de luz	47
Figura 35 – Parâmetros ajustados em função da temperatura nos testes sem madeira	48
Figura 36 – Parâmetros ajustados em função da luminosidade nos testes sem madeira	48
Figura 37 – Parâmetros ajustados em função da umidade nos testes sem madeira . .	49
Figura 38 – Funções ajustadas para os parâmetros dos testes sem madeira	49
Figura 39 – Parâmetros ajustados em nos testes a 30°C	50
Figura 40 – Curvas de fermentação média para os testes a 30°, com e sem madeira	50

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos	15
1.3	Justificativa	15
1.4	Organização do Trabalho	16
2	ASPECTOS CONCEITUAIS	17
2.1	Processo produtivo do açúcar de coco	17
2.2	Internet das coisas	19
2.3	LoRa	20
2.4	Função sigmoide	20
3	METODOLOGIA	23
4	ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS	25
4.1	Requisitos funcionais	25
4.2	Requisitos não funcionais	25
5	DESENVOLVIMENTO	27
5.1	Discussões da aplicação	27
5.2	Projeto e Implementação	28
5.2.1	Arquitetura geral do sistema	28
5.2.2	Escolha de tecnologias base	29
5.2.2.1	Microcontrolador	29
5.2.2.2	Comunicação de longo alcance	29
5.2.3	Módulo de sensoriamento	30
5.2.4	Receptor	33
5.2.5	Visão geral do software	33
5.2.6	Servidor Web	36
5.3	Testes e Avaliação	36
5.3.1	Testes em ambiente controlado	36
5.3.2	Teste no cenário real	40
5.4	Análise dos dados	42
5.5	Conclusões do desenvolvimento	50
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
6.1	Contribuições	53

6.2	Perspectivas de Continuidade	53
6.2.1	Melhorias de hardware	53
6.2.2	Melhorias de software	54
6.2.3	Continuidade da aplicação e estudos	54
	 REFERÊNCIAS	 57

1 Introdução

1.1 Motivação

O açúcar de coco é um produto que, assim como os mais diversos produtos naturais, tem ganhado espaço no mercado, sendo uma boa alternativa ao açúcar convencional, contendo grandes quantidades de minerais como o potássio, sódio e magnésio, além de ser rico em antioxidantes e possuir mais vitaminas C, B1, B3, B4 e B10 que o açúcar derivado da cana ([ASGHAR et al., 2020](#)).

De acordo com o pontuado por [Samriddhi e Roshan \(2022\)](#) em "Coconut Sugar Market by Form (Organic, Conventional), by End User (Commercial, Residential), by Application (Food and Beverage, Cosmetics, Personal Care), by Sales Channel (Hypermarkets, Specialty Stores, E-Commerce, Business to Business): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031", o valor do mercado desse açúcar está projetado para alcançar 408,7 milhões de dólares em 2031, sendo que atualmente, grande parte da produção comercial está concentrada em países do Sudeste Asiático, tendo os principais países produtores, Filipinas, Indonésia e Tailândia, concentrando cerca de 80% da produção das últimas décadas.

Em um contexto de crescente uso do açúcar de coco tanto em ambiente doméstico quanto comercial, alguns casos se destacam. Um deles é o da Mombora, startup do setor de alimentos que tem como seu principal produto uma alternativa géis de carboidrato, produto muito utilizado no meio esportivo, 100% natural e com base em frutas nativas do Brasil, visando o estabelecimento de uma cadeia de suprimentos mais sustentável. Com um forte crescimento, a Mombora faz o uso do o açúcar de coco nas suas composições, utilizando toneladas deste insumo anualmente, com uma tendência expressiva de aumento de tal demanda.

No contexto atual, com produções extrativistas e artesanais nestes países, ainda há diversas brechas de padronização e qualidade dos produtos que hoje estão presentes no mercado, muitas vezes sendo possível identificar materiais indesejáveis no produto comercializado, como fragmentos de insetos ou galhos, por exemplo, como analisado por [Pauli-Yamada et al. \(2020\)](#).

O processo de produção do açúcar de coco ocorre basicamente em duas etapas: a extração da seiva da flor do coqueiro e a sua concentração. Na extração, são feitos cortes na flor do coqueiro, a partir dos quais a seiva goteja em um recipiente que deve ser coletado em no máximo 5 horas, de acordo com definido por [PHILIPPINE NATIONAL STANDARD \(2015\)](#) no "Código de Práticas Higiênicas para Açúcar de Coco". Já a concentração é



Figura 1 – Amostra de açúcar de coco com fragmento de galho e fragmento plástico registrada pela Mombora

realizada aquecendo e agitando o produto filtrado, a fim de obter o produto final, como xarope ou açúcar cristalizado.



Figura 2 – Foto de uma coleta real de seiva

Uma das grandes complicações presentes no processo de extração da seiva dá-se pelo fato dela ter uma fermentação muito rápida dentro do recipiente de coleta, levando a perdas frequentes de matéria prima, já que a inclusão de uma seiva fermentada por vir a prejudicar as características do produto ou até mesmo impedir a sua cristalização. Além disso, esse problema acaba gerando uma grande carga de trabalho físico, visto que para garantir a qualidade do produto, os produtores responsáveis pela coleta da seiva precisam subir múltiplas vezes por dia no mesmo coqueiro para retirar o produto fresco, que poderá então ser refrigerado ou processado, a fim de manter um $\text{pH} \geq 6$, por exemplo (PHILIPPINE NATIONAL STANDARD, 2015). Isso acaba levando a problemas de controle de qualidade e eficiência operacional e uma condição de trabalho desagradável, pela falta de conhecimento real das condições de fermentação do material, que acarreta

em uma perda de eficiência para a operação produtiva.

1.2 Objetivos

Tendo em vista esse cenário, no qual existem diversas formas de se obter ganhos ao permitir que as perdas por fermentação sejam reduzidas, este projeto tem como objetivo realizar o desenvolvimento de uma solução completa capaz de trazer ganhos de eficiência para a produção de açúcar de coco, atuando desde o entendimento inicial do processo produtivo e de seus problemas, até a obtenção de resultados iniciais, visando futuramente auxiliar na viabilização de uma produção em escala de açúcar de coco em solo nacional, visando uma aplicação comercial associada à Mombora.

Nesse sentido, após o entendimento dos problemas, buscou-se como objetivo a elaboração um sistema de coleta de dados e monitoramento remoto da qualidade da extração de seiva da flor do coqueiro, com o propósito de entender o impacto da temperatura, umidade e luminosidade na taxa de variação do ph, a fim de compreender de forma mais completa o fenômeno da fermentação da seiva, visando reduzir perdas, buscar aumentos na eficiência operacional da produção, melhorar as métricas de controle de qualidade e melhorar as condições de trabalho dos coletores.

De forma mais específica, visou-se desenvolver um protótipo unitário de um módulo de sensoriamento remoto portátil de baixo custo, capaz de se conectar a uma interface central de monitoramento de fácil acesso para os produtores, por meio de um receptor simples capaz de conectar o módulo de sensoriamento à internet, mesmo quando ele estiver posicionado em áreas remotas, sem acesso direto à rede, como é o caso de muitas fazendas. Dessa forma, a pessoa responsável pela coleta poderá ver em tempo real o pH do produto no recipiente, além dos outros parâmetros complementares de temperatura, umidade e luminosidade, para ter uma noção geral das condições do produto em coleta.

Além disso, os dados coletados serão armazenados em um banco de dados, a partir do qual serão executadas análises mais detalhadas. Essa abordagem visa proporcionar uma compreensão mais profunda das relações entre as variáveis ambientais e a qualidade da seiva coletada, avaliar métodos alternativos para preservação da seiva e contribuir para a otimização contínua do processo de produção.

1.3 Justificativa

Esse projeto foi escolhido para ser desenvolvido majoritariamente por conta da crescente demanda do açúcar de coco no mercado, tanto em âmbitos domésticos, sendo ele uma alternativa menos processada e mais nutritiva que o açúcar refinado, como comerciais,

com produtos que fazem uso de tal açúcar em sua composição, como os da Mombora, já mencionados.

Esse cenário, associado à produção não expressiva de açúcar de coco em solo nacional, mostra que a produção nacional de açúcar de coco pode ser uma interessante oportunidade comercial no meio das produções sustentáveis, visto que de acordo com o exposto por [Samriddhi e Roshan \(2022\)](#), é projetado que o valor de mercado do açúcar de coco alcance 408,7 milhões de dólares em 2031.

Além disso, esse projeto também é importante sobre a ótica da sustentabilidade, visto que uma produção nacional do açúcar de coco, potencialmente otimizada pela tecnologia que será desenvolvida, gera e melhora a qualidade de empregos além de sustentar o reflorestamento, por estabelecer mais incentivos financeiro para a manutenção de plantações de coqueiros.

1.4 Organização do Trabalho

Nos próximos capítulos, serão abordados os aspectos conceituais gerais utilizados no projeto, a metodologia a seguida durante todo desenvolvimento, a definição de requisitos funcionais e não funcionais para o sistema, o detalhamento de cada etapa do desenvolvimento, as conclusões obtidas com as análises e os direcionamentos futuros ao projeto.

2 Aspectos Conceituais

Diversas dificuldades estão presentes no processo de alcançar os objetivos estabelecidos, dentre elas o entendimento sobre o processo produtivo do açúcar de coco como um todo, a fim de pontuar as dificuldades com mais assertividade, o estudo das tecnologias de conexão e comunicação para os equipamentos e o armazenamento e processamento de dados. Dessa forma, neste capítulo serão aprofundados alguns conceitos importantes para o desenvolvimento do projeto.

2.1 Processo produtivo do açúcar de coco

A fim de esclarecer o entendimento da situação como um todo, é importante apresentar com mais detalhes o processo de produção do açúcar de coco por completo. De acordo com o apresentado na análise de lucratividade do conselho de agricultura da Filipinas [PHILIPPINE NATIONAL STANDARD \(2010\)](#), o processo pode ser definido em 6 passos:

1. **Escolha do coqueiro e manipulação da espada:** Nesta primeira etapa, é essencial selecionar cuidadosamente os coqueiros prontos para a colheita. Após a escolha, a espada do coqueiro é dobrada e cortada a uma profundidade de aproximadamente 6mm, até que a seiva comece a fluir.
2. **Coleta da seiva:** Após o corte da espada, um recipiente é posicionado para coletar a seiva que flui do coqueiro, como pode ser visto na figura 3. Nesse estágio, a seiva contém entre 12% e 18% de açúcar e é altamente suscetível à fermentação, como já mencionado. Recomenda-se coletar a seiva a cada cerca de 5 horas para garantir um pH aceitável para as próximas etapas. É nesse ponto que o projeto em desenvolvimento desempenha um papel crucial, visando um monitoramento mais preciso e uma compreensão aprofundada da influência dos parâmetros estudados.
3. **Evaporação no calor:** A seiva coletada é aquecida a uma temperatura de 115°C para evaporar o excesso de água. Durante essa etapa, uma espuma se forma, a qual deve ser cuidadosamente removida para evitar perda de qualidade do produto, como visto na figura 4. A evaporação dura aproximadamente 3 horas.
4. **Conversão de xarope para açúcar:** Nesta fase, o xarope resultante da evaporação é aquecido sob agitação constante, como na figura 5. É durante essa etapa que ocorre a granulação do açúcar, transformando o xarope em cristais sólidos.



Figura 3 – Coleta da seiva, com sacos plásticos



Figura 4 – Evaporação da seiva - Imagem de ([PHILIPPINE NATIONAL STANDARD, 2010](#))

5. **Peneiragem e secagem:** Como parte das etapas finais de refinamento do produto, os cristais de açúcar obtidos anteriormente são peneirados para criar um açúcar mais fino e homogêneo. Posteriormente, o açúcar é submetido ao processo de secagem para garantir que o produto final seja estável e durável, evitando problemas de umidade e deterioração.
6. **Finalização:** Por fim, o açúcar de coco é pesado e embalado de acordo com as especificações necessárias para a comercialização.

Com essa descrição completa, pode-se verificar que, por mais que o foco desse projeto seja a etapa de coleta da seiva, ainda há muito a ser otimizado em diversas etapas.



Figura 5 – Processo de cristalização - Imagem de ([PHILIPPINE NATIONAL STANDARD, 2010](#))

2.2 Internet das coisas

De acordo com [Mouha \(2021\)](#), a Internet das Coisas (IoT) é um conceito em constante evolução no campo da tecnologia da informação. De forma geral, esse conceito se refere à interconexão via internet de sensores capazes de coletar e transmitir dados automaticamente, sendo que existem diversas aplicações para esse conceito, desde aplicações em automações residenciais a usos na indústria e monitoramento de condições climáticas, por exemplo.

A IoT proporciona uma estrutura na qual os sensores têm presença e representação na internet. A tecnologia incorporada permite interações com estados internos e o ambiente externo, contribuindo para processos de tomada de decisão. O objetivo da IoT é criar novas aplicações e serviços que conectem os mundos físico e virtual, trazendo diversos ganhos em diversos setores.

Uma forma tradicional de descrever sistemas IoT é a arquitetura de três camadas, que se consiste na camada de percepção, na qual os sensores são a interface física entre o mundo real e os dispositivos, na camada de rede, que conecta os dispositivos e servidores, e na camada de aplicação, na qual os dados obtidos são trabalhados, levando a direcionamento de ações ou ativação de atuadores, por exemplo.

Assim, tal arquitetura fornece um direcionamento inicial para este projeto, visto que serão desenvolvidos um equipamento para o sensoriamento (camada de percepção), uma solução para comunicação remota e envio dos dados para um servidor (camada de rede) e uma abordagem analítica sobre os dados, buscando obter conhecimentos sobre o fenômeno estudado e obter ganhos produtivos (camada de aplicação)

2.3 LoRa

A tecnologia LoRa, como descrita por [Devalal e Karthikeyan \(2018\)](#), é amplamente empregada em projetos IoT, apresentando uma série de pontos positivos que a tornam adequada para o contexto deste projeto. Esta tecnologia tem como base a modulação de rádio frequência que permite uma comunicação de longo alcance, tornando possível a conexão entre dispositivos posicionados em áreas remotas, com um alcance de até 5 km em áreas urbanas e 15 km em áreas rurais ([SEMTECH CORPORATION, 2019](#)), com base em uma derivação da tecnologia *Chirp Spread Spectrum (CSS)*. Além disso, a LoRa se destaca por seu baixo custo de implementação, uma ponto que se alinha às necessidades do projeto. A eficiência energética é outro ponto forte, sendo essencial para dispositivos alimentados por bateria, contribuindo para a autonomia dos componentes do sistema.

Para fins comparativos, é interessante entender as principais diferenças operacionais entre a tecnologia LoRa, o WiFi e a rede celular, visto que essas duas últimas alternativas são muito comuns atualmente. Avaliando sob a perspectiva do alcance, o WiFi se mostra como a tecnologia mais limitada neste quesito, sendo que a rede celular possui uma grande cobertura, quase integral em áreas urbanas, mas muitas vezes ausente em áreas rurais, alvo desse projeto. Com base nessa limitação, tal perspectiva já direciona as vantagens do uso da tecnologia LoRa neste projeto

Ainda assim, é importante pontuar alguns aspectos negativos relacionados a esta tecnologia. Quando comparada com o WiFi e a rede celular, a LoRa revela uma desvantagem significativa na taxa de transferência de dados. Sua capacidade de transmissão é limitada, o que a torna menos eficaz para aplicações que exigem altas taxas de transferência, como streaming de vídeo em tempo real. Além disso, a variabilidade na latência pode ser um ponto crítico em cenários que dependem de comunicação instantânea. Apesar disso, dentro do escopo do projeto desenvolvido, que envolve a transmissão periódica de pequenas quantidades de dados sem a exigência de baixa latência, essas desvantagens não são relevantes, destacando a LoRa como uma escolha apropriada e eficaz para a aplicação proposta, podendo-se aproveitar seu potencial como um todo.

Dessa forma, a tecnologia LoRa será aplicada no projeto como forma de permitir que os sensores posicionados em áreas remotas consigam enviar suas leituras para o servidor

2.4 Função sigmoide

A função sigmoide é uma importante função dentro do contexto do aprendizado de máquina ([SAEED, 2021](#)), que possui um comportamento que se adapta bem a diversos fenômenos naturais. De forma geral, essa função é descrita da seguinte forma ([WEISSTEIN, 2023](#)):

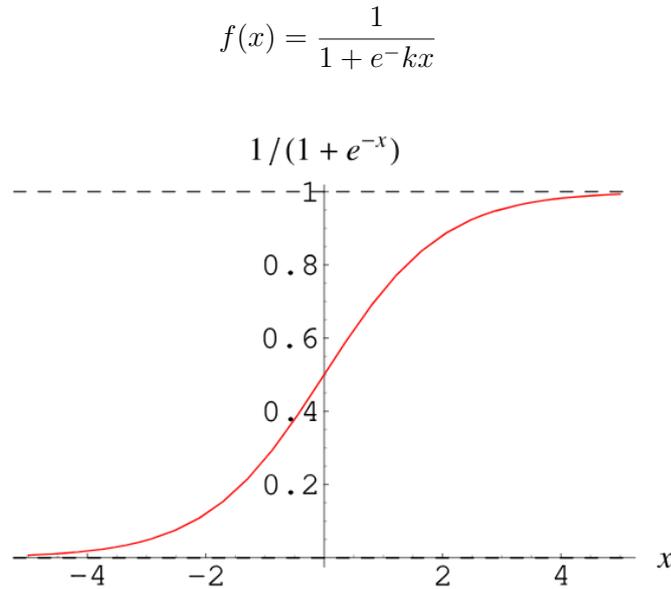


Figura 6 – Gráfico sigmoide - Imagem de (WEISSTEIN, 2023)

Assim, de maneira simplificada, obtém-se uma curva que possui um nível inferior e um nível superior, com a variável k descrevendo a inclinação da faixa de transição entre os dois níveis, tendo a sua derivada descrita como $dy/dx = [1 - y(x)]y(x)$, que tem seu ponto máximo entre os dois níveis. Sob essa lógica, pensando que o fenômeno de fermentação pode ser também descrito como um estado inicial, um estado final, e uma velocidade da fermentação, pode-se realizar uma simples modificação nessa função para descrever de forma aproximada as curvas de fermentação obtidas neste projeto com base na função sigmoide. A função adaptada é a seguinte:

$$f(x) = b + \frac{L - b}{1 + e^{k(x-x_0)}}$$

Nessa função adaptada, L representa a diferença entre os dois níveis, b um deslocamento no eixo y , visto que não há um patamar zero nas avaliações de fermentação, k , assim como antes, descreve a inclinação da faixa de transição entre os dois níveis, porém agora sem o sinal negativo, invertendo o sentido da função, já que em um estudo de fermentação o pH é inicialmente maior e decai a um nível menor, e x_0 descreve um deslocamento no eixo x , que permite que a posição da função seja ajustada para a duração dos testes.

Assim, essa função servirá como base para as análises executadas neste projeto.

3 Metodologia

A fim de guiar o desenvolvimento do trabalho, foi definida a seguinte metodologia a ser seguida.

No primeiro momento, o projeto focou em entender o processo produtivo, suas dificuldades e demandas, a fim de definir os requisitos do projeto como um todo. Nesse momento, foram consultados diversos materiais disponíveis na internet, como vídeos e guias em texto, como por exemplo o vídeo produzido por [AlaaStarves \(2022\)](#) e o guia de práticas de higiene ([PHILIPPINE NATIONAL STANDARD, 2015](#)) e a análise de lucratividade ([PHILIPPINE NATIONAL STANDARD, 2010](#)), já apresentados, além da realização de conversas com pessoas envolvidas diretamente no processo produtivo do açúcar de coco.

Com a definição dos requisitos, foi desenhada a arquitetura geral do sistema, tendo como base a arquitetura de três camadas de sistemas IoT, dividida entre a camada de percepção, a camada de rede e a camada de aplicação.

A partir disso, o projeto foi direcionado para a elaboração do hardware responsável pelo sensoriamento (camada de percepção), contendo os sensores de pH, temperatura ambiente, umidade ambiente e luminosidade incidente no recipiente de coleta, um microcontrolador, a solução para alimentação e o módulo de comunicação de longa distância. Logo em seguida, foi trabalhado desenvolvido o hardware receptor da conexão de longa distância, responsável por enviar os dados ao servidor web (camada de rede), junto da solução física de encapsulamento dos sistemas e o software de cada um, fechando o sistema de coleta e armazenamento de dados como um todo.

Com o sistema implementado e operando, o próximo passo se resume à execução de testes em ambiente controlado. Inicialmente os testes foram focados na identificação de eventuais problemas, para a inclusão de uma rápida etapa de retrabalho dos pontos já desenvolvidos, se necessário. Após isso, foram realizados testes e coleta de dados utilizando seiva congelada, a fim de manter com mais fidelidade as características da seiva fresca, visando entender a influência dos parâmetros com menor variação possível de condições iniciais. Com esses testes, foi trabalhada uma análise mais aprofundada, visando a obtenção de conclusões e entendimentos gerais referentes ao fenômeno de fermentação estudado (camada de aplicação).

Após essa etapa de estudo e entendimento geral da fermentação da seiva, o projeto também foi levado para o cenário real de coleta em uma fazenda de coqueiros com um projeto piloto de produção de açúcar de coco, onde foram avaliados a eficácia e usabilidade real do protótipo, verificando a qualidade das medições, eficácia das comunicações e o

funcionamento da visualização e armazenamento dos dados, visando verificar pontos de melhoria.

Por fim, foram avaliadas as conclusões obtidas com o projeto, assim como pontuados os problemas e melhorias que poderiam ser implementadas, visando evoluções futuras.

O desenvolvimento dessas etapas descritas está representado no fluxograma na figura 7:

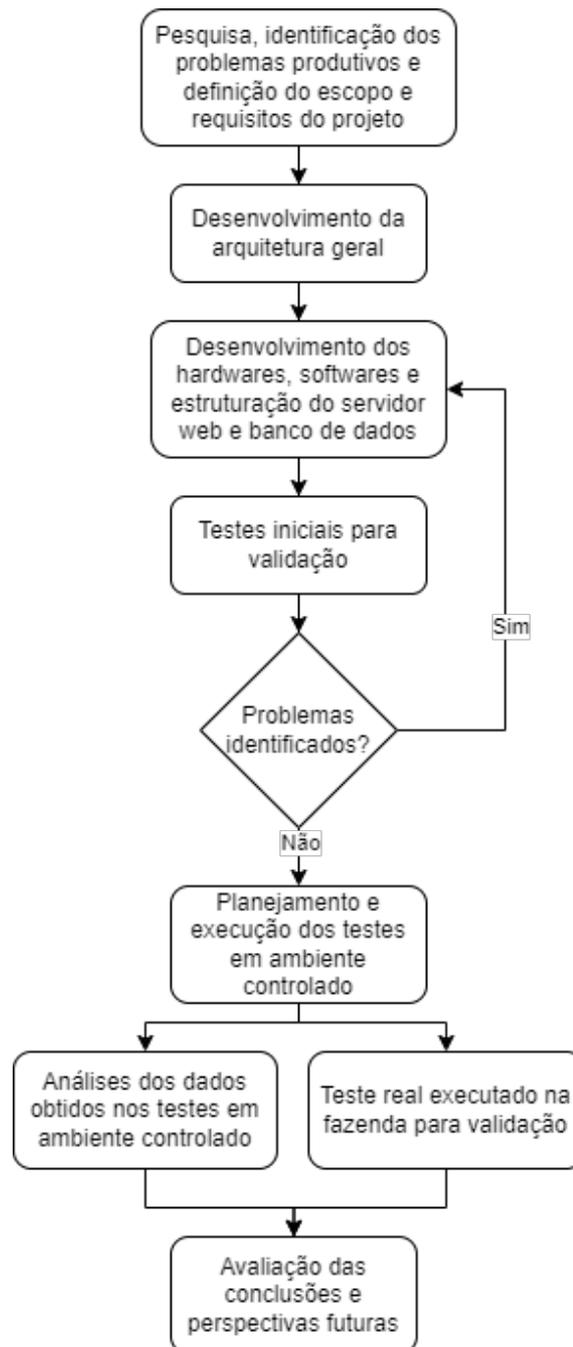


Figura 7 – Fluxograma do desenvolvimento do projeto

4 Especificação de Requisitos

Visando a construção de um sistema funcional e eficiente, é necessário que o projeto dos equipamentos desenvolvidos seja guiado pelos seguintes requisitos.

4.1 Requisitos funcionais

- Considerando o caso de uso apresentado, é de suma importância que o equipamento tenha um uso simples, com funções restritas a poucas operações.
- A instalação do equipamento no coqueiro deve se restringir apenas a ação de posicioná-lo no local.
- De forma equivalente, o receptor deve passar apenas por uma configuração inicial, e após isso apenas precisar estar conectado a alimentação para funcionar, não dependendo de outras ações.
- Os usuários devem poder visualizar os dados em tempo real.
- Os dados devem ser automaticamente direcionados para um banco de dados a fim de permitir uma aquisição de dados mais extensa para desenvolvimento das análises e modelos futuros.
- O módulo de sensoriamento deverá ser capaz de medir os seguintes parâmetros:
 - pH da seiva coletada
 - Temperatura ambiente
 - Umidade ambiente
 - Luminosidade incidente no recipiente

4.2 Requisitos não funcionais

- O equipamento deve ser projetado de forma a consumir a menor quantidade possível de energia, a fim de prolongar a vida útil da bateria, considerando que o equipamento deverá ser portátil e irá operar em áreas remotas. Isso pode ser alcançado com uma escolha assertiva de componentes, visando uso de componentes de baixo consumo de energia, somado a implementação de recursos de economia de energia, como suspensão e desligamento automático quando não estiver em uso.

- O equipamento deve ser projetado levando em consideração a possibilidade do uso em escala do módulo de sensoriamento. Isso implica na utilização de uma tecnologia de comunicação adequada.
- Com a perspectiva de um uso futuro em escala, deve-se buscar soluções de baixo custo, sem comprometer a qualidade e a funcionalidade do equipamento. O uso de componentes de custo acessível e a simplificação do protótipo são alguns dos aspectos a serem considerados para reduzir os custos.
- A interface de visualização deve ser simples, contendo apenas as informações necessárias para o acompanhamento do processo
- O equipamento deve ser capaz de se comunicar de forma confiável em áreas remotas, onde a conectividade pode ser limitada, cenário presente em muitas fazendas.

5 Desenvolvimento

Tendo como base as especificações apresentadas e os objetivos definidos, focando na obtenção dos dados para entendimento da interação entre as variáveis estudadas visando a melhoria do processo, esse tópico tem o intuito de apresentar com detalhes cada etapa do desenvolvimento.

5.1 Discussões da aplicação

Tendo em vista o grande consumo de açúcar de coco por parte da Mombora na sua linha de produtos, e os pontos críticos relacionados ao açúcar importado, que restringe a flexibilidade com relação a esse insumo e em alguns casos apresenta problemas de qualidade, a empresa iniciou um projeto paralelo voltado para o desenvolvimento de uma planta piloto de produção de açúcar de coco no Brasil.

Assim, inicialmente, com o intuito de trazer melhorias para a cadeia produtiva do açúcar de coco, foram levantadas, em conversas, uma série de possíveis aplicações, que em sua grande maioria acabaram por ser descartadas nos primeiros momentos, por conta da grande complexidade de cada uma. Em meio a isso, inicialmente, foi proposto a elaboração de um sistema que pudesse monitorar o pH de todas as seivas em coleta, capaz de fornecer informações aos trabalhadores da fazenda e permitir planejar as coletas de forma a reduzir as cargas de trabalho, com o desenvolvimento de um algoritmo capaz de fornecer o horário e rota de coleta que minimizaria perdas. Porém, em discussão com pessoas mais próximas do campo, foram levantados diversos problemas na proposta, sendo os principais a dificuldade para obtenção de resultados iniciais sem um maior investimento para a produção de mais de um dispositivo e o grande impacto do uso desses equipamentos no cotidiano já estabelecido.

Com isso, o projeto inicialmente proposto sofreu uma alteração em seu direcionamento, sendo voltado para a coleta de dados para alimentação de análises visando o entendimento da interação entre as variáveis, permitindo melhorias iniciais no processo e no planejamento com um baixo investimento e testes mais simples. Nesse momento, também foram definidos quais parâmetros seriam acompanhados. Pela natureza do processo, a temperatura ambiente foi levantada como o ponto principal, porém também foi sugerido o monitoramento da umidade e da luminosidade incidente sobre o recipiente, por conta de observações já feitas pelos próprios coletores.

5.2 Projeto e Implementação

5.2.1 Arquitetura geral do sistema

Com o intuito de proporcionar uma compreensão mais abrangente da estrutura necessária para alcançar os resultados desejados, o diagrama apresentado na figura 8 oferece uma representação simplificada da arquitetura geral do sistema, com base na arquitetura de três camadas de sistemas IoT. Este diagrama servirá como uma visão geral inicial, com detalhes mais específicos apresentados nos próximos tópicos.

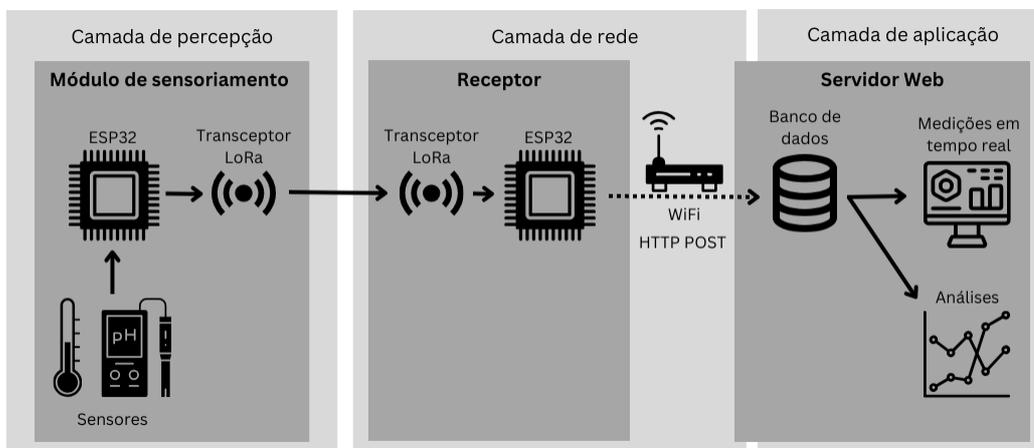


Figura 8 – Arquitetura geral do projeto

O diagrama ilustra três componentes principais para o funcionamento do sistema: o módulo de sensoriamento, o receptor e o servidor web. Cada um desempenha um papel fundamental no processo de coleta e armazenamento dos dados. O módulo de sensoriamento coleta dados de sensores posicionados nas amostras a serem estudadas. Esses dados são então encapsulados em uma mensagem estruturada e transmitida para o receptor por meio da tecnologia de comunicação LoRa. A escolha da comunicação LoRa é essencial para a viabilidade do sistema devido ao seu notável alcance de transmissão, uma vez que permite que o módulo de sensoriamento seja posicionado em locais remotos, onde o acesso direto à Internet é limitado ou inexistente.

O receptor atua como um intermediário da comunicação, servindo como a porta de entrada dos dados enviados pelo módulo de sensoriamento. Uma vez recebidos, esses dados são então transmitidos para um banco de dados central por meio de uma conexão sem fio com a Internet. Como já mencionado, o uso da tecnologia LoRa permite que o receptor seja posicionado próximo a um ponto de acesso a internet, tornando essa estrutura funcional.

Por fim, os dados que são coletados e armazenados no banco de dados alimentam duas principais áreas de aplicação: uma página que apresenta uma visualização básica em tempo real dos dados coletados e um conjunto de análises que permite um entendimento

mais aprofundado desses dados e da correlação entre os parâmetros estudados. Por meio dessas duas aplicações dos dados será possível obter informações importantes para o entendimento do processo de extração da seiva do coqueiro, permitindo que sejam realizadas otimizações operacionais.

5.2.2 Escolha de tecnologias base

Tendo em vista as especificações já apresentadas e a arquitetura definida, diante da grande variedade de soluções presentes no mercado, esse tópico trás em mais detalhes a discussão a respeito da seleção das tecnologias base do projeto.

5.2.2.1 Microcontrolador

Levando em conta as necessidades de baixo custo e eficiência energética, foi escolhido para o projeto um microcontrolador da classe ESP32, mais especificamente a placa de desenvolvimento ESP32 Devkit v1. Por possuir um baixo custo, ser direcionado para aplicações IoT de baixo consumo de energia, já possuindo funções de sleep mode de alta eficiência que podem vir a ser utilizadas visando a economia de energia, possuir um módulo de comunicação WiFi e Bluetooth integrado e ser de fácil uso (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023), este microcontrolador se adequa bem às necessidades desse projeto, com uma excelente versatilidade, tanto no módulo de sensoriamento, quanto no receptor.



Figura 9 – Placa de desenvolvimento ESP32 Devkit v1

5.2.2.2 Comunicação de longo alcance

Para atender o requisito de operação remota do módulo de sensoriamento, foi escolhida para o projeto a tecnologia LoRa para realizar a comunicação entre os módulos.

Essa escolha foi feita pelo fato da comunicação LoRa possuir uma alta eficiência energética, associada a um alto alcance, por ser baseada na modulação de rádio frequência, com baixa banda. Como nesse projeto não há um grande volume de dados transmitido entre os pontos que estarão se comunicando, essa tecnologia se aplica muito satisfatoriamente para a comunicação ponto a ponto, já que o volume de dados transmitido é uma das principais desvantagens que a comunicação LoRa apresenta quando comparada com o WiFi ou redes celulares, por exemplo. Além disso, em um cenário futuro, utilizando mais dispositivos para coleta de dados, uma rede LoRaWan poderá ser implementada com um único gateway robusto para consolidar a comunicação de forma mais adequada.

No mercado estão disponíveis placas de desenvolvimento que combinam a tecnologia LoRa com o microcontrolador ESP32, porém, por uma questão de custos, essa solução não será utilizada neste projeto. Optou-se por utilizar as placas de desenvolvimento ESP32 Devkit v1 com o módulo de comunicação LoRa SX1278, de baixo custo e simples operação.

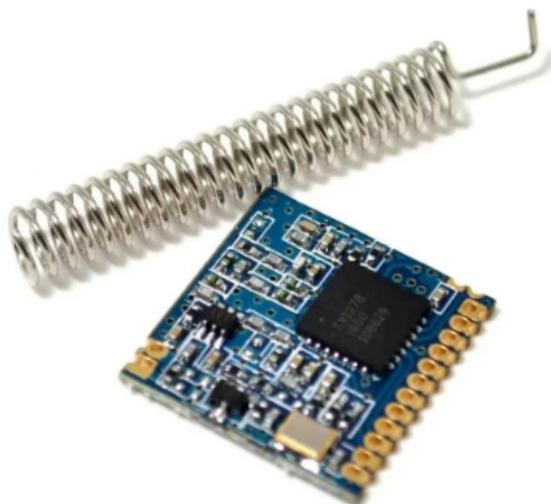


Figura 10 – Módulo SX1278

5.2.3 Módulo de sensoriamento

Como já apresentado, o módulo de sensoriamento tem como base para seu processamento e comunicação a placa de desenvolvimento ESP32 Devkit v1 e o módulo de comunicação LoRa SX1278. Essa estrutura básica é alimentada por 3 sensores que coletam os dados necessários, sendo eles o PH4502c, o DHT11 e o BH1750, com a alimentação de todo sistema partindo de uma bateria externa de 20000mAh, com uma saída de 5V.

O módulo PH4502c é responsável pela leitura do pH. Esse sensor recebe a diferença de potencial obtida por meio de um eletrodo para medição de pH e a converte para uma

saída analógica linear capaz de ser lida pelo microcontrolador, contando também com um termômetro para compensação do cálculo do pH. Diferente da placa ESP32 Devkit v1, que opera em 3,3V, este módulo trabalha com alimentação e saída de 5V, sendo necessário adicionar um divisor de tensão para garantir que não haja a saturação do sinal de saída. Além disso, por se tratar de um sensor analógico sensível, é essencial que sejam feitas calibrações e verificações da precisão da medição com frequência. Para isso, é necessário utilizar soluções tampão de calibração de estejam dentro da faixa em que o sensor irá operar, sendo assim escolhidas as soluções de $\text{pH} = 4,0$ e $\text{pH} = 7,0$, já que é considerado que a seiva fresca possui um pH próximo ao neutro e se acidifica com o tempo.



Figura 11 – Sensor Ph4502c e eletrodo

Essa sensibilidade e necessidade constante de calibração é um dos pontos que mais inserem complexidade no sistema como um todo. Para operação correta, é necessário que o operador do equipamento esteja sempre atento à qualidade das medições. Além disso, o eletrodo possui uma estrutura de vidro que comporta uma solução interna, que interage com a solução de interesse gerando a diferença de potencial que é medida pelo módulo. Essa estrutura exige uma constante limpeza e armazenamento em uma solução de cloreto de potássio para conservação, criando mais complexidade para o uso do equipamento.

O sensor DHT11 é responsável pelas leituras de temperatura e umidade ambiente, enquanto o BH1750 realiza as medições de incidência de luz, medida em lux. Esses dois sensores possuem saídas digitais, com calibração de fábrica, simplificando o uso no módulo de sensoriamento.

O DHT11 [12] possui uma comunicação digital com um único canal, sendo integrado ao micro controlador com apenas uma porta GPIO, com auxílio da biblioteca “DHT sensor library” ([ADAFRUIT, 2023](#))



Figura 12 – Soluções de calibração pH = 4 e pH = 7 e solução de cloreto de potássio

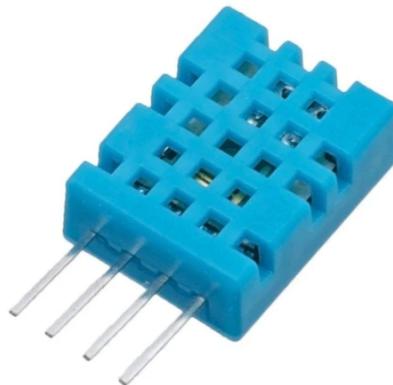


Figura 13 – Sensor DHT11

O BH1750 [13], por sua vez, se comunica com o microcontrolador com uma comunicação I2C, necessitando de duas portas GPIO, uma para transmissão dos dados entre os dois componentes e uma para o sinal do clock. A integração desse sensor é baseada na biblioteca “BH1750” (LAWS, 2022)

Com esses elementos elaborados, o processamento presente no microcontrolador é bastante simples. As leituras dos sensores são agregadas em uma única variável de texto com separadores de fácil identificação para leitura dos dados no receptor e são posteriormente enviadas em um pacote LoRa, com auxílio da biblioteca “LoRa” (MISTRY, 2019). Nesse momento, o valor enviado referente a leitura do sensor de pH não equivale ao valor do pH em si, mas à leitura analógica da saída do sensor, para permitir que os parâmetros de calibração sejam adicionados no receptor, facilitando esse processo.



Figura 14 – Sensor BH1750

5.2.4 Receptor

Assim como o módulo de sensoriamento, o receptor tem sua estrutura baseada na placa de desenvolvimento ESP32 Devkit v1 e o módulo de comunicação LoRa SX1278. Apenas com esses dois componentes, o receptor é capaz de receber o pacote LoRa que contém os dados dos sensores, ler cada parâmetro individualmente e estruturar uma requisição HTTP de postagem dos dados, a ser enviada pela conexão WiFi, já integrada à ESP32, armazenando assim os dados no servidor web, tendo como base o publicado por [Danielle \(2023\)](#).

Por ser projetado para operar em locais com maior infraestrutura, a alimentação do receptor será proveniente de uma fonte de alimentação de 5V, certamente disponível próximo ao ponto de acesso WiFi utilizado para conexão com o servidor web. Mesmo assim, caso seja necessário operar em um ambiente apenas com a presença de uma rede celular, é possível alimentar o receptor com uma bateria portátil, também com saída de 5V, e utilizar um aparelho celular como ponto de acesso.

A operação desse componente é bastante simples, bastando que ele esteja ligado para seu funcionamento. Durante todo tempo de operação o receptor aguarda pelo recebimento do pacote LoRa e sua sincronização. Quando o pacote é recebido, os dados da mensagem são separados em variáveis distintas para posteriormente serem inseridos na requisição HTTP a ser enviada para o servidor

5.2.5 Visão geral do software

Tendo como base os dispositivos descritos anteriormente e seus funcionamentos, o software de cada um foi desenvolvido na Arduino IDE com base na lógica descrita pelo fluxograma representado pela figura 15:

O módulo de sensoriamento possui menos complexidade, apenas realizando as

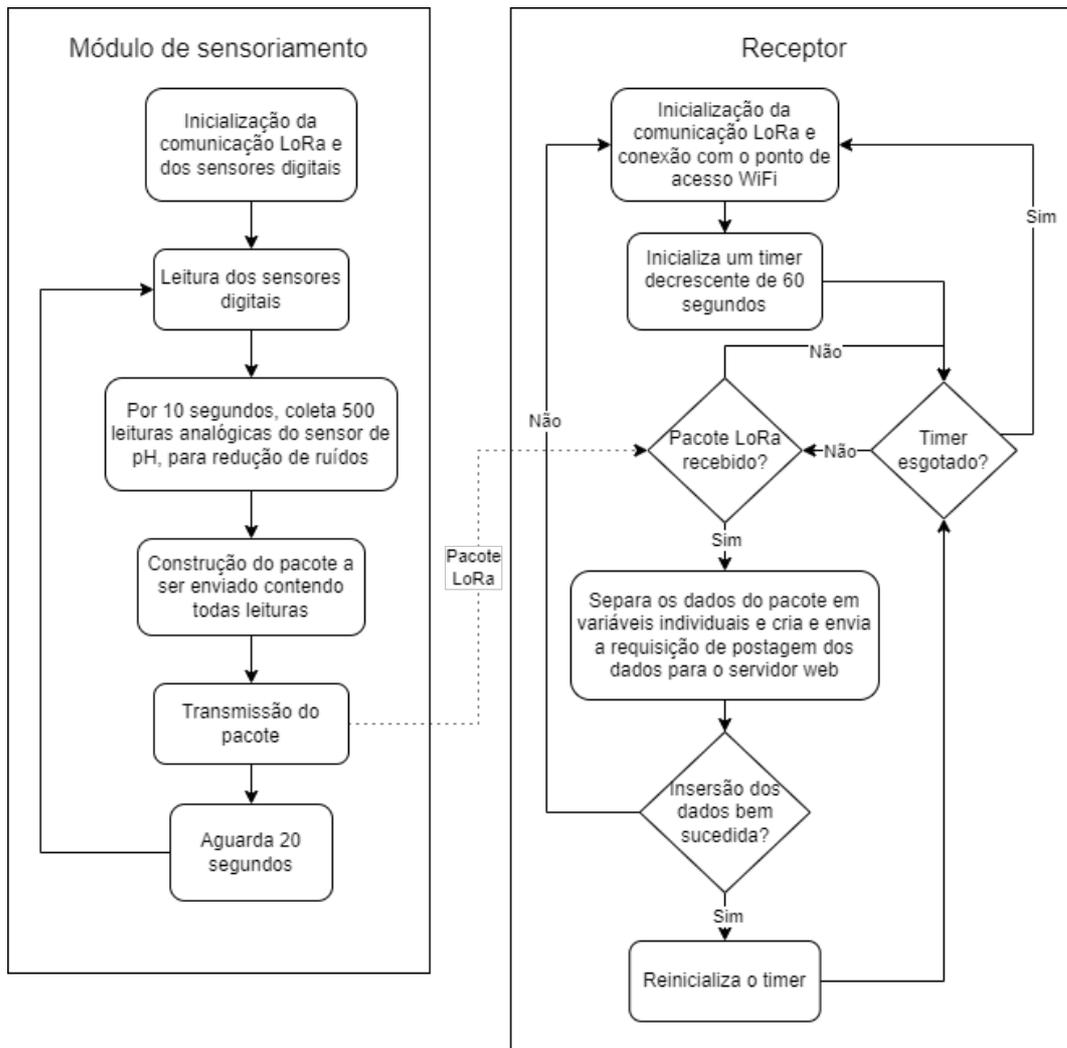


Figura 15 – Fluxograma com a estrutura lógica dos softwares de cada dispositivo

leituras dos sensores, com a execução de um volume maior de leituras do sensor de pH para redução de ruídos, construção e transmissão dos pacotes a cada 30 segundos. Com o intuito de enviar todos os dados em um único pacote, os dados são consolidados em uma string com separadores definido, da seguinte forma: “[contador] ! [luminosidade] @ [temperatura] # [umidade] \$ [leitura pH]”. Essa estrutura permite que o pacote seja facilmente tratado pelo receptor, que com base nos separadores, recupera cada medida e a armazena em uma variável independente. Os trechos de código que realizam essa função são apresentados nas figuras 16 e 17

O receptor também possui uma base de funcionamento bastante simples, recebendo os pacotes, como já descrito, formulando a requisição de postagem das informações no banco de dados do servidor web e enviando essa requisição por meio da conexão WiFi. Porém, durante os testes com os dispositivos, foi possível verificar que ocorriam dois problemas que interrompiam o funcionamento do sistema. Em alguns momentos, o receptor

```
LoRa.beginPacket();
LoRa.print(contador);
LoRa.print("!");
LoRa.print(lux);
LoRa.print("@");
LoRa.print(t);
LoRa.print("#");
LoRa.print(h);
LoRa.print("$");
LoRa.print(tensaoPh, 5);
LoRa.endPacket();
```

Figura 16 – Criação do pacote a ser enviado no módulo de sensoriamento

```
String LoRaData = LoRa.readString();
int pos1 = LoRaData.indexOf('!');
int pos2 = LoRaData.indexOf('@');
int pos3 = LoRaData.indexOf('#');
int pos4 = LoRaData.indexOf('$');
contador = LoRaData.substring(0, pos1).toInt();
luminosidade = LoRaData.substring(pos1 + 1, pos2).toFloat();
temperatura = LoRaData.substring(pos2 + 1, pos3).toFloat();
umidade = LoRaData.substring(pos3 + 1, pos4).toFloat();
tensao_ph = LoRaData.substring(pos4 + 1, LoRaData.length()).toFloat();
```

Figura 17 – Leitura do pacote e separação dos dados no receptor

perdia a sua conexão com a internet, impedindo que novos dados fossem inseridos no banco de dados, e também, em raras ocasiões, deixava de identificar pacotes transmitidos pelo módulo de sensoriamento.

Atacando esses problemas, foi inserida uma checagem da resposta da solicitação de postagem dos dados no banco de dados, reiniciando o receptor caso a ação não tenha sido bem sucedida, e uma variável de checagem de recebimento de pacotes, associada a uma interrupção de temporizador, capaz de reiniciar o dispositivo caso não haja nenhum recebimento de pacote. Ao inicializar o dispositivo, é declarado um temporizador decrescente configurado em 60 segundos que é reinicializado cada vez que o dispositivo identifica que um pacote foi recebido. Caso o tempo estipulado se esgote, o que implica que dois pacotes enviados não foram recebidos, uma interrupção é acionada, alterando o valor de uma variável que leva a reinicialização do dispositivo. Com essa abordagem, todas interrupções de funcionamento do sistema foram solucionadas.

Por fim, um ponto também relevante com relação ao receptor é a calibração das leituras do sensor de pH. A informação enviada pelo módulo de sensoriamento é a tensão efetivamente medida pela porta analógica do microcontrolador, portanto é necessário que seja feito o cálculo para conversão desse valor. Para isso, é necessário alterar no código os

valores referentes às soluções de calibração de $\text{pH} = 4$ e $\text{pH} = 7$ em variáveis definidas para essa função, para que a conversão seja realizada corretamente. Além disso, para conexão com a rede WiFi, também é necessário atualizar manualmente no código as credenciais de acesso à rede, passo que só precisa ser executado uma única vez, considerando que o equipamento será utilizado no mesmo local por algum tempo

5.2.6 Servidor Web

Este servidor tem a função de armazenar as informações em seu banco de dados, além de ser utilizado para apresentação dos dados medidos em tempo real, como apresentado na figura 18. Os principais componentes do servidor web são o banco de dados, já estruturado de acordo com os dados que serão coletados, armazenando um identificador único por registro, temperatura, umidade, pH, luminosidade, o carimbo de tempo da inserção do dado no banco e o indicador de força do sinal recebido (RSSI), e dois scripts PHP, sendo um deles responsável por receber a mensagem enviada pelo receptor e adicionar as informações ao banco de dados, enquanto o outro permite a visualização das leituras armazenadas. Com essa estrutura, é fácil para qualquer pessoa acessar a visualização de dados em tempo real [em uma página simples](#), bastando apenas que essa pessoa tenha acesso a internet, além de também permitir a inserção de dados apenas por conectar os módulos à alimentação de maneira bastante simples e rápida.

ID	Temperatura	Umidade	Luminosidade	pH	RSSI	Timestamp
37853	35	40	7876.67	6.89	-95	2023-11-27 15:17:37
37852	35	40	7873.33	6.89	-95	2023-11-27 15:17:06
37851	35	40	7930.83	6.87	-96	2023-11-27 15:16:36

Figura 18 – Visualização dos dados obtidos

5.3 Testes e Avaliação

5.3.1 Testes em ambiente controlado

Nessa etapa, foi elaborado o planejamento e execução dos testes em ambiente controlado. A premissa básica neste estágio foi a de obter a maior estabilidade da condição inicial e parâmetros ao longo dos testes, visando extrair conclusões gerais relacionadas ao processo estudado. Além disso, também foram estabelecidos testes para avaliar uma variável externa como um potencial inibidor de fermentação. Como exposto por [Elvina, Nurminah e Karo-Karo \(2020\)](#), o uso de madeira de jaca pode trazer ganhos significativos, sendo essa variável incluída no planejamento de testes para avaliar e metrificar tais ganhos.

Inicialmente foi feito um planejamento básico dos testes, no qual foram estipulados um total de 12 testes com duração de 5 horas, tendo como base para essa decisão o tempo recomendado pelo [PHILIPPINE NATIONAL STANDARD \(2015\)](#), sendo esses testes distribuídos da seguinte forma:

- 3 testes a 30°C, sem qualquer aditivo
- 3 testes a 30°C, utilizando madeira de jaca (3% da massa da seiva)
- 3 testes a 20°C, sem qualquer aditivo
- 3 testes a 20°C, utilizando madeira de jaca (3% da massa da seiva)

Partindo dessa definição, foi operacionalizado a coleta, refrigeração e transporte da seiva. Tendo como referência os 12 testes planejados, considerando uma margem para eventuais perdas e as condições das coletas realizadas no dia, foram porcionados 22 volumes com 170 ml cada, em embalagem selada, as quais foram congeladas em gelo seco assim que fechadas, para melhor preservação das condições iniciais. Vale ressaltar que nesse momento, para obter uma maior uniformidade entre as amostras, todo conteúdo coletado em campo foi misturado em um único recipiente para ser posteriormente individualizado, com características mais similares. Por fim, esse material foi coletado por transportado em um recipiente térmico com gelo, até um congelador no local onde foram realizados os testes de fermentação.

Com essa etapa concluída, foi dado início aos testes. Todos foram realizados em uma sala pequena, com a seiva posicionada próxima à janela, para que pudesse haver incidência de luz, com o controle de temperatura realizado pelo ar condicionado disponível.

Na primeira tentativa de realizar um teste, notou-se uma grande instabilidade na medida do pH, que apresentou grandes oscilações que inviabilizaram a calibração e seu uso. Inicialmente tal problema foi atacado com a implementação de um cálculo de média com um maior volume de leituras, em software, porém após uma análise com mais cautela, verificou-se que o sensor apresentava um problema, sendo então substituído. Com o novo sensor, o problema antes presente foi eliminado, alcançando uma precisão excelente na medição do pH, com erros próximos a $\pm 0,02$.

Após essa correção, os testes foram efetivamente iniciados, porém, logo foi identificada uma nova complicação. Ao avaliar os resultados em tempo real, ficou claro que, por mais que 5 horas seja o tempo máximo recomendado para a permanência da seiva no recipiente de coleta no ambiente produtivo, a decisão de realizar testes de 5 horas não foi adequada. Isso porque em alguns casos com essa duração, o pH não apresentaria uma variação relevante, podendo ficar inclusive acima do pH 6, referência geral de qualidade no momento. Por conta disso, visando obter mais dados e aprofundar esse entendimento, esses

testes foram estendidos, sendo alguns realizados por cerca de 8 horas e outros por cerca de 12 horas. Além disso, o cronograma estipulado foi simplificado e foram adicionados testes noturnos, sem luminosidade, visando otimizar o aproveitamento do tempo disponível para os testes e facilitar a visão de impacto da luminosidade sobre a taxa de variação do pH. Assim, os novos testes planejados foram:

- Testes a 30°C
 - 1 com incidência de luz
 - 1 sem incidência de luz
 - 1 sem incidência de luz e com madeira de jaca
- Testes a 20°C
 - 1 com incidência de luz
 - 1 sem incidência de luz
 - 1 sem incidência de luz e com madeira de jaca

Com esse novo plano, os testes foram executados, ocorrendo problemas em 3 testes. Em um deles, o pH inicial da seiva estava muito abaixo dos demais testes realizados, fazendo com que o resultado fugisse muito do esperado, em outro, houve um problema com o sensor de pH, em que um pedaço de papelão encostou nos terminais da conexão do eletrodo de pH no módulo do sensor, altamente sensíveis, fazendo com que as medidas fossem alteradas erroneamente, expondo mais um ponto de cuidado desse sensor, devido à alta sensibilidade do eletrodo, e por fim em um outro teste houve uma queda de energia por conta de uma forte chuva, levando a perda de dados durante esse período e à danificação do sensor de luminosidade. Em todos esses casos os testes foram repetidos e os problemas avaliados criticamente visando entender eventuais melhorias futuras.

Com todos ajustes e correções necessárias, os 6 primeiros testes foram executados. Cada teste contou com uma calibração inicial e uma checagem da calibração no fim, visando validar a precisão das medidas ao longo de todo teste. Além disso, os primeiros testes foram acompanhados com maior atenção, fazendo uma validação das leituras com um phmetro externo. Os dados obtidos foram tratados, removendo leituras incoerentes, pontos fora da curva e interpolando dados perdidos, obtendo os resultados iniciais apresentados na figura 19

Avaliando esses resultados iniciais, as principais noções básicas extraídas foram que a temperatura influenciou drasticamente as taxas de fermentação, enquanto a luminosidade apresentou uma influência não relevante nos testes. Além disso, com a temperatura ambiente a 20°C, a adição da madeira não foi relevante, porém, com a temperatura ambiente a 30°C

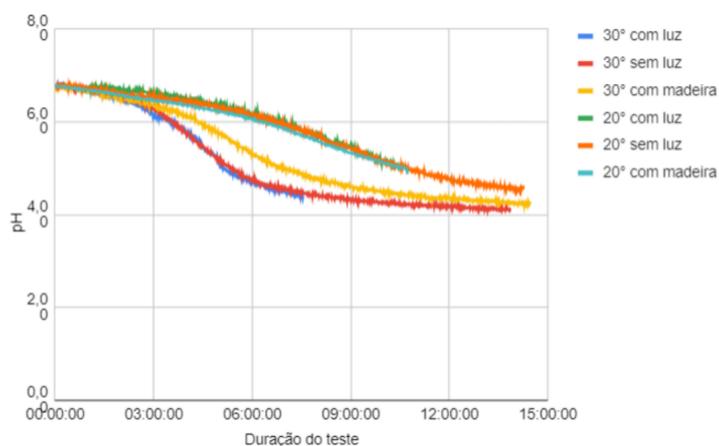


Figura 19 – Testes iniciais

houve um benefício expressivo. Por conta disso, o teste com madeira a 30°C foi repetido, dessa vez com incidência de luz, obtendo o resultado apresentado na figura 20

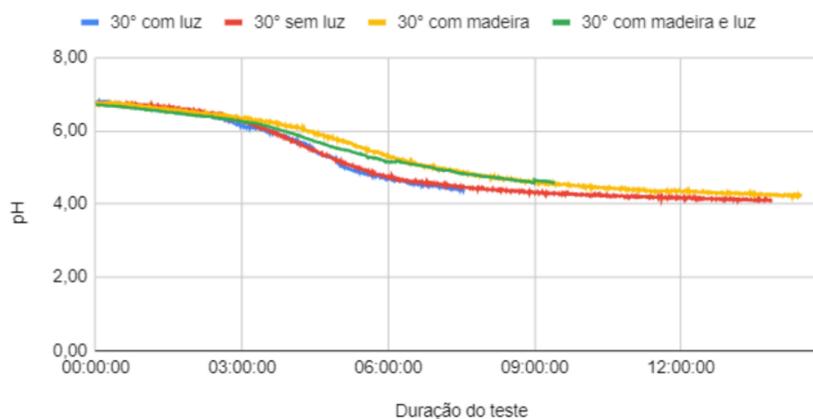


Figura 20 – Resultados após a repetição do teste com a madeira de jaca

O resultado obtido valida o ganho do uso da madeira como inibidor de fermentação nesse caso, indicando uma primeira oportunidade de melhoria do processo a curto prazo. Além disso, visando obter um melhor entendimento do efeito da temperatura na fermentação, foram realizados dois testes a 25°C, com e sem luz, obtendo-se os resultados apresentados na figura 21

Com isso, os tais dados poderão ser utilizados para elaboração de um modelo simples com viés preditivo, em que, em análise rápida das curvas obtidas, é representada uma relação não linear entre a temperatura e a taxa de fermentação.

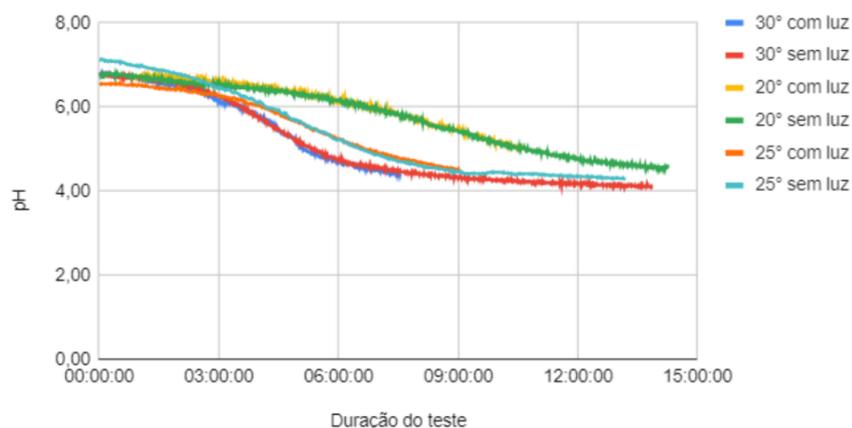


Figura 21 – Inclusão dos testes a 25°C

5.3.2 Teste no cenário real

Como uma etapa de validação do sistema, complementar aos testes realizados em ambiente controlado, visando a aplicação futura para coleta de dados em maior volume, que por questões de cronograma não pode ser executada nesse projeto, foi executado um teste real em uma fazenda de coqueiro com um projeto piloto de produção de açúcar de coco. Esse teste foi realizado em uma coleta real, posicionando o módulo de sensoriamento no coqueiro, com o eletrodo do sensor de pH dentro do recipiente de coleta. O receptor foi posicionado em uma área mais distante da plantação, onde se localiza um ponto de acesso WiFi, sendo verificada uma distância de cerca de 150 metros entre esses dois dispositivos, com auxílio de imagens de satélite, como indicado na figura 22.



Figura 22 – Imagem de satélite da fazenda, para obtenção da distância aproximada entre os equipamentos



Figura 23 – Início do teste



Figura 24 – Fim do teste

Nesse teste, a coleta de dados foi bem sucedida, sem grandes problemas no sistema desenvolvido. Ainda assim, foi possível verificar pontos de melhoria para o futuro, dentre eles a possibilidade de ganhos com um invólucro resistente a água, visto que a possibilidade de chuva no dia do teste foi uma preocupação, que poderia ter interrompido o teste, e a possibilidade de simplificar o processo de calibração do sensor de pH, com alguma automação via software, com uma interface visual ou sonora no próprio equipamento, visto que essa tarefa tomou bastante tempo, e no cenário real seria executada por pessoas com menos experiência e menos tempo disponível.

Observando a curva do pH obtido nesse teste, é interessante pontuar dois pontos relevantes que diferem o resultado obtido no teste real do teste em ambiente controlado. Inicialmente, por iniciar a coleta de dados com o recipiente de coleta com uma quantidade

extremamente reduzida de seiva, é possível notar uma pequena elevação do pH nos momentos iniciais, visto que há seiva nova gotejando no recipiente, em um comportamento de estabilização das medidas e do pH inicial. Além disso, também pelo mesmo fato de sempre haver seiva fresca entrando na solução medida, é notável que o pH possui uma taxa de variação menor que a verificada nos testes em ambiente controlado, visto que o teste na fazenda ocorreu a uma temperatura de 35°C.

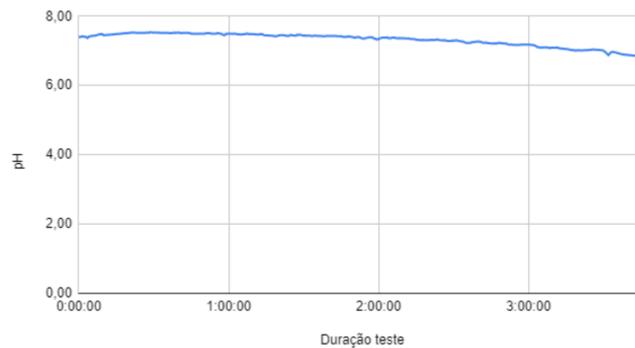


Figura 25 – Resultado do teste realizado na fazenda

Com isso, o funcionamento do sistema fica validado por completo, permitindo que futuramente sejam realizadas aquisições de dados em maior volume para um estudo mais aprofundado do fenômeno.

5.4 Análise dos dados

Nessa seção são abordadas as análises realizadas com os dados obtidos. Em primeiro momento, foi necessário realizar um tratamento geral de todos os testes. Pela arquitetura do sistema, ocasionalmente são registrados valores incorretos na base de dados, que são facilmente identificados, ou ocorrem leituras não registradas. Para isso, é realizado um tratamento simples que exclui valores errados e posteriormente faz a interpolação dos valores faltantes, considerando que deveriam haver uma leitura para cada 30 segundos. Além disso, o carimbo de tempo é tratado, transformando os horários registrados em duração do teste, em segundos, aproximando os registros para intervalos exatos de 30 segundos entre cada.

Com isso, partindo dos dados tratados, em análise mais aprofundada foi possível verificar que os resultados obtidos se ajustam bem a uma função sigmóide, na qual inicialmente os valores são mais estáveis, seguido de um aumento da taxa de variação, para uma posterior estabilização das medidas, descrita pela seguinte equação:

$$f(x) = b + \frac{L - b}{1 + e^{k(x-x_0)}}$$

Esse fenômeno, assim como as conclusões obtidas pela inspeção visual inicial dos gráficos obtidos, são coerentes com a natureza do fenômeno. Por se tratar de uma fermentação, envolvendo uma interação entre bactérias e o açúcar da seiva, é de se esperar que esse comportamento em que a temperatura tem forte influência descrito pela sigmóide esteja presente, visto que em um primeiro momento a proliferação das bactérias aceleram o processo de fermentação, enquanto o consumo do açúcar presente na solução faz com que o pH se estabilize no fim da fermentação. Assim, o uso da função sigmóide facilitará as avaliações e elaboração do modelo preditivo básico a ser desenvolvido, sendo uma aproximação boa o suficiente para esta abordagem.

Para os testes executados em ambiente controlado, foi executado um ajuste de função em python, obtendo para cada caso os parâmetros L , b , k e x_0 da função, como apresentado nas figuras de 26 a 34.

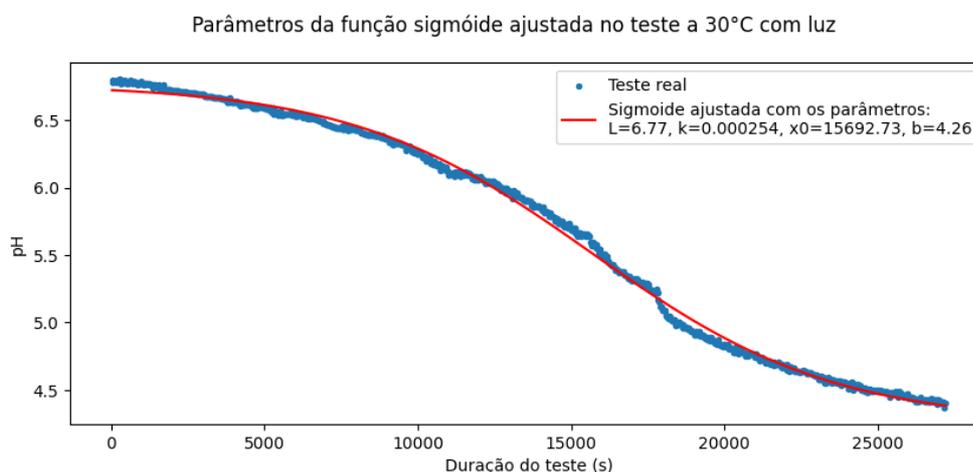


Figura 26 – Ajuste da sigmóide no teste a 30° C com incidência de luz

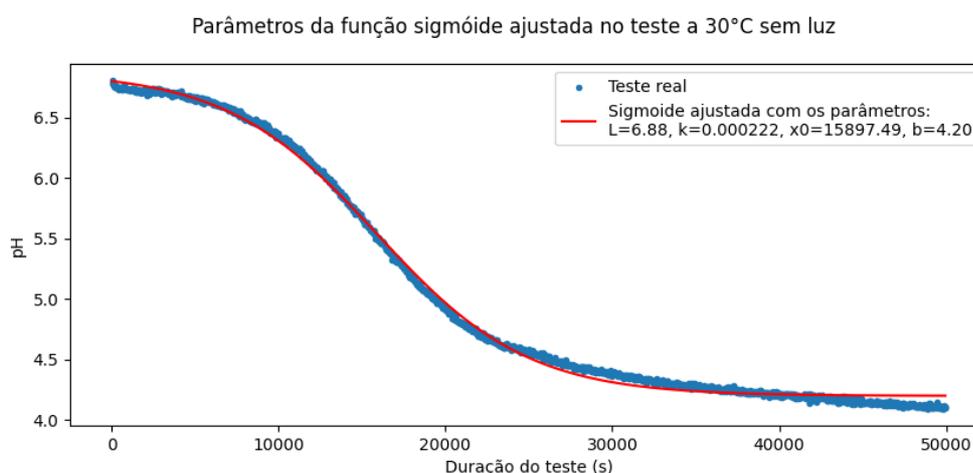


Figura 27 – Ajuste da sigmóide no teste a 30° C sem incidência de luz

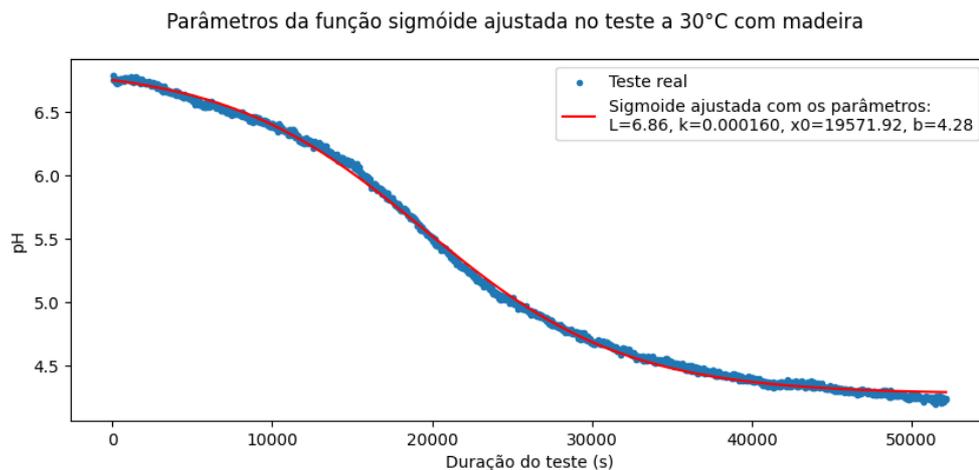


Figura 28 – Ajuste da sigmoide no teste a 30° C com madeira de jaca e sem incidência de luz

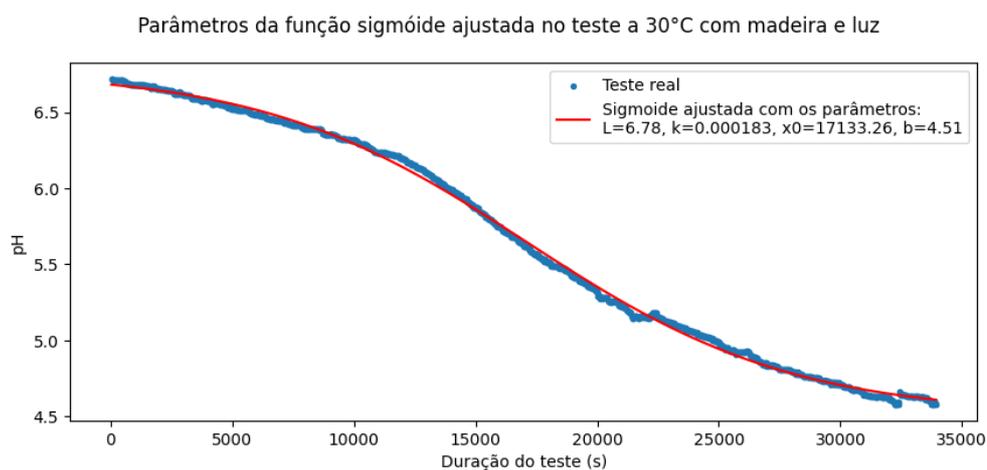


Figura 29 – Ajuste da sigmoide no teste a 30° C com madeira de jaca e com incidência de luz

Partindo disso, tendo os parâmetros das funções ajustadas em mãos, as seguintes análises se basearam em comparar os tais parâmetros calculados nos testes. A tabela 1 reúne todas informações dos testes e parâmetros ajustados e servirá como base para as análises seguintes.

Inicialmente, tendo em vista que o pH inicial e final da seiva são características que dependem majoritariamente das características do próprio material, não dependendo das condições dos testes em si, nota-se que os valores de L e b são similares para todos os testes, com um L médio de 6,86 e um b médio de 4,22, que descrevem, de maneira geral, o pH inicial e final dos testes com a seiva utilizada.

Por outro lado, os parâmetros k e x0, que descrevem de maneira geral a inclinação da curva, apresentam uma grande variação entre os testes. Avaliando inicialmente apenas

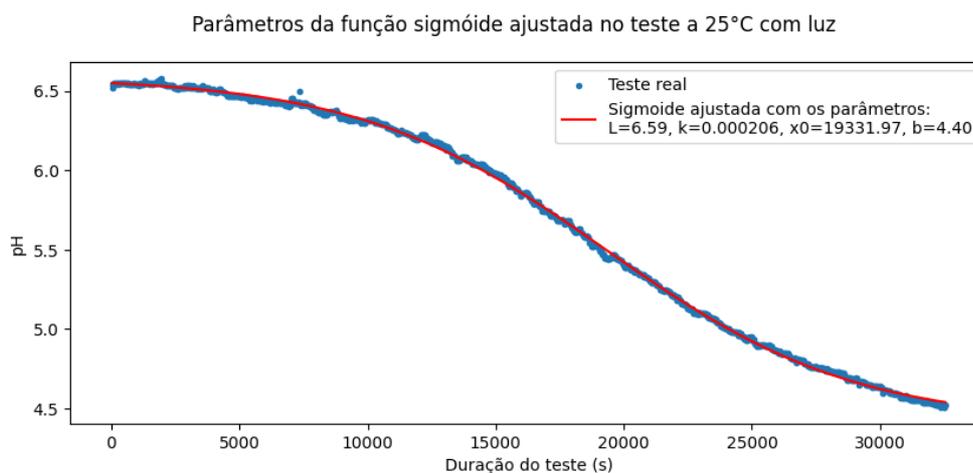


Figura 30 – Ajuste da sigmoide no teste a 25° C com incidência de luz

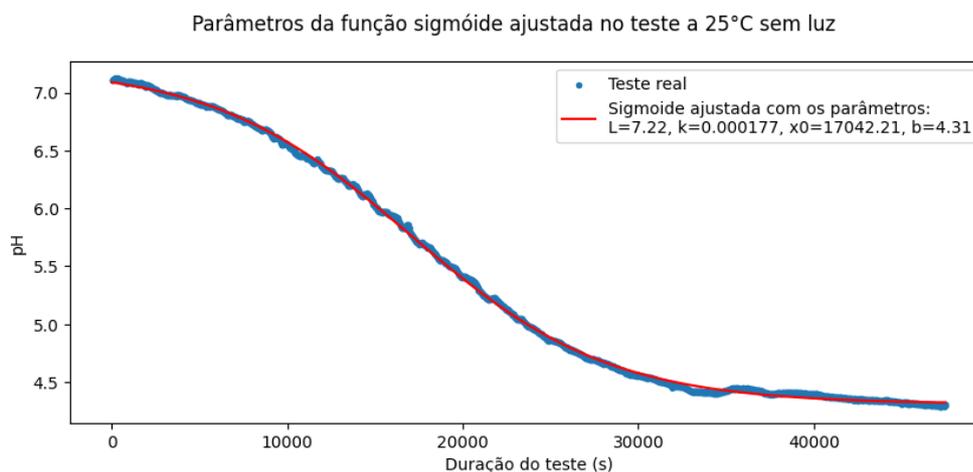


Figura 31 – Ajuste da sigmoide no teste a 25° C sem incidência de luz

os testes sem o uso da madeira de jaca como inibidor de fermentação (Testes 1, 2, 5, 6, 7 e 8), pode-se observar o comportamento apresentado nas figuras de 35 a 37.

De forma geral, avaliando os resultados obtidos nessas análises, é possível notar o claro impacto da temperatura nos parâmetros da curva ajustada, reforçando o já observado anteriormente. Com relação a luminosidade, não é possível identificar nenhum padrão com esse volume de dados obtidos, e com relação a umidade, é possível notar uma diferença principalmente nos testes em que foram registradas umidades médias de 70 e 80 %. Porém, neste caso, também é possível verificar que esse casos com maior umidade correspondem aos testes a 20°C, fazendo que nenhum padrão mais específico venha a ser obtido dessa visão. Dessa forma, foi definido o foco das análises seguintes na influência da temperatura, visto que não foi possível identificar nenhuma correlação entre os outros parâmetros e as curvas de variação do pH.

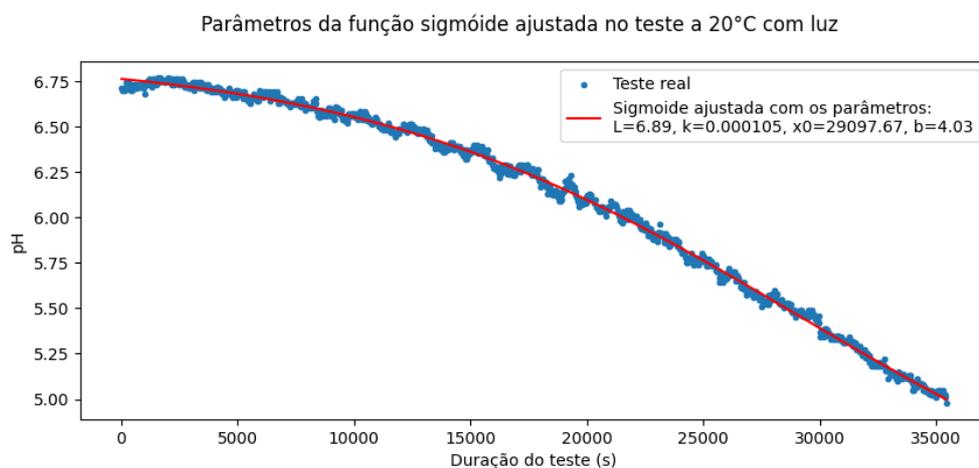


Figura 32 – Ajuste da sigmoide no teste a 20° C com incidência de luz

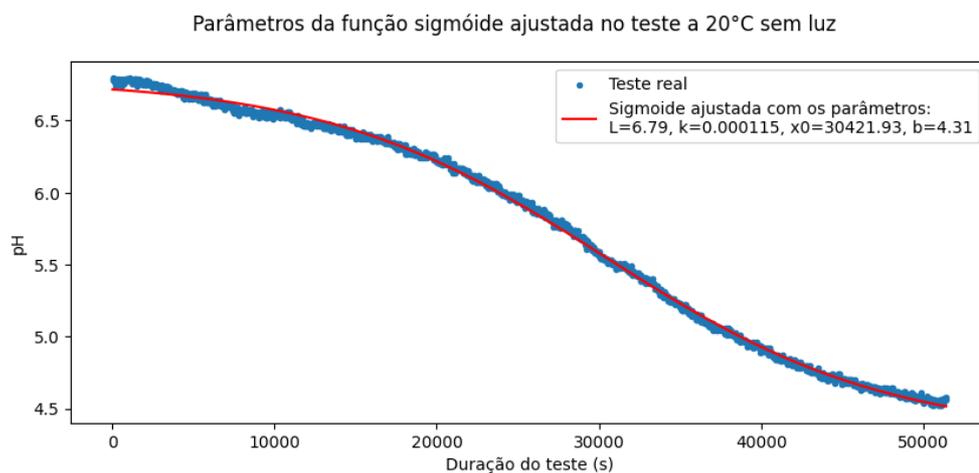


Figura 33 – Ajuste da sigmoide no teste a 20° C sem incidência de luz

Nesse momento, também ficou claro um ponto em que o projeto desenvolvido deixou a desejar, pensando na natureza do fenômeno e nos resultados obtidos. Ao verificar que a influência da luminosidade e da umidade nos resultados foi irrelevante, mesmo que esse tenha sido um parâmetro sugerido pelas pessoas mais próximas do processo, ao mesmo tempo em que é notável a forte influência da temperatura nos resultados, fica claro que o sistema carece de um sensor que monitore a temperatura da própria seiva em si, trazendo um dado mais relevante sob a ótica da fermentação.

Avançando ainda mais nessa análise, para ter um entendimento mais completo da variação dos parâmetros das funções ajustadas pela temperatura, foi feito o ajuste de duas funções de segundo grau para os parâmetros k e x_0 , representadas na figura 38

Dessa forma, a partir das funções obtidas para k e x_0 e dos valores médios de L e b obtidos anteriormente, é possível elaborar uma nova função, capaz de descrever a curva de

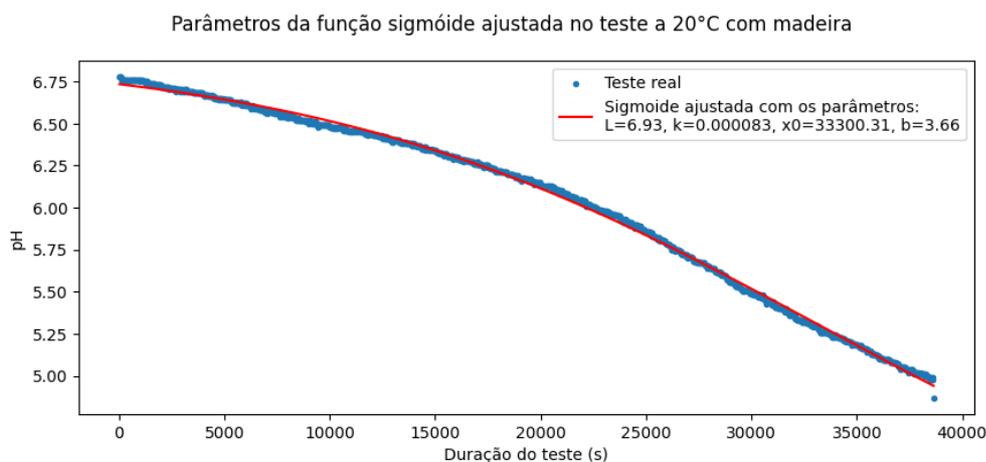


Figura 34 – Ajuste da sigmoide no teste a 20° C com madeira de jaca sem incidência de luz

	Temperatura média (°C)	Umidade média (%)	Luminosidade	Madeira	L	b	k	x0
Teste 1	30	47	Não	Não	6,88	4,20	0,000222	15897
Teste 2	30	60	Sim	Não	6,77	4,26	0,000254	15692
Teste 3	30	50	Não	Sim	6,86	4,28	0,000160	19571
Teste 4	30	45	Sim	Sim	6,78	4,51	0,000183	17133
Teste 5	25	62	Não	Não	7,22	4,31	0,000177	17042
Teste 6	25	65	Sim	Não	6,59	4,40	0,000206	19332
Teste 7	20	80	Não	Não	6,79	4,31	0,000115	30422
Teste 8	20	70	Sim	Não	6,89	4,03	0,000105	29097
Teste 9	20	70	Não	Sim	6,93	3,66	0,000083	33300

Tabela 1 – Testes e parâmetros da sigmoide ajustada sobre a curva de pH real

variação do ph no tempo, com base na temperatura. Essa nova função obtida é:

$$pH(t, T) = 4,22 + \frac{2,64}{1 + e^{(-6,92 \cdot 10^{-7} T^2 + 4,73 \cdot 10^{-5} T - 5,59 \cdot 10^{-4})(t - (183 T^2 - 1,06 \cdot 10^4 T + 1,69 \cdot 10^5))}}$$

Com isso, é possível estimar curvas de fermentação para diferentes temperaturas, considerando o intervalo de 20°C a 30°C. Essa informação é valiosa, porque permite estimar o tempo restante até que o pH atinja um valor determinado, facilitando o planejamento de coletas e reduzindo perdas. Em um cenário real, sabendo a previsão de temperatura para o dia, é possível utilizar tal modelo para planejar o intervalo máximo entre as coletas, reduzindo perdas e eventualmente poupando trabalho, caso a seiva possa permanecer nos recipientes por mais tempo. Vale ressaltar que, por conta do volume de dados, tal abordagem apresenta suas limitações de precisão, principalmente por conta de todos testes terem sido realizados com o mesmo material, com características muito próximas. No entanto, essa análise se mostra satisfatória como uma abordagem geral de análise funcional

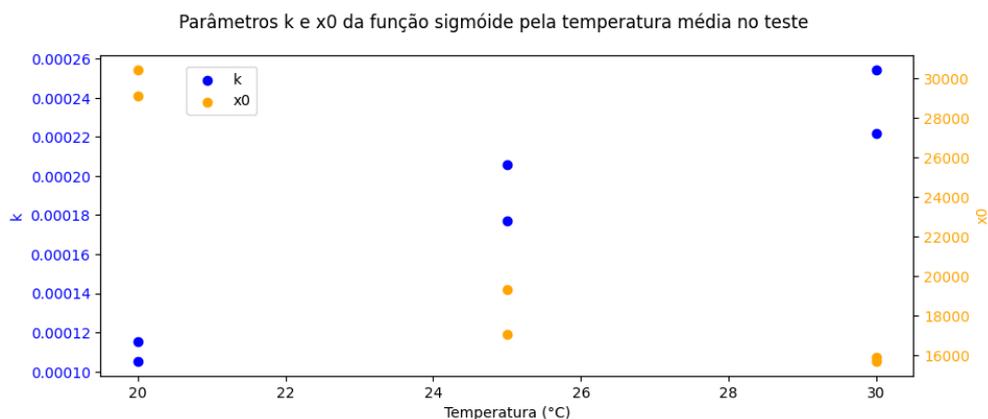


Figura 35 – Parâmetros ajustados em função da temperatura nos testes sem madeira

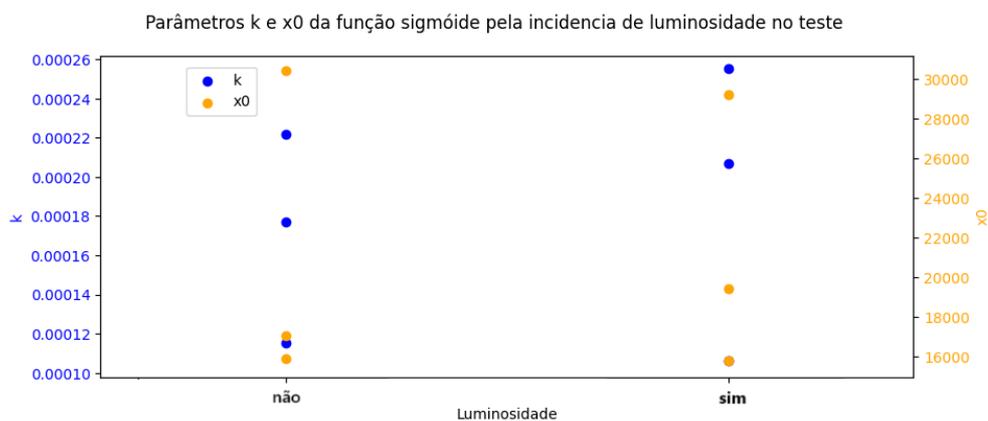


Figura 36 – Parâmetros ajustados em função da luminosidade nos testes sem madeira

que pode ser utilizada como base para avaliações mais avançadas com um volume maior de dados.

Por fim, avaliando os dados dos testes a 30°C com e sem madeira (Testes 1, 2, 3 e 4) da mesma forma, buscando visualizar os padrões de comportamento, obtendo-se a visão apresentada na figura 39.

Assim como na avaliação da temperatura, fica claro a diferença entre os cenários com e sem o uso da madeira de jaca como inibidor natural de fermentação. Para formalizar os ganhos obtidos por essa abordagem, foi realizado o cálculo da média dos parâmetros obtidos, presentes na tabela 2, para obter uma curva aproximada que representa os fenômenos com base nos dados existentes, para os dois casos.

Com isso, foi possível obter as curvas de fermentação média para os testes a 30°C, com e sem madeira, apresentadas na figura 40:

Nessa visão, as linhas horizontais indicam o instante em que o pH possuiria valor igual a 6. Assim, é possível notar que, com base nas funções obtidas, com o uso da madeira

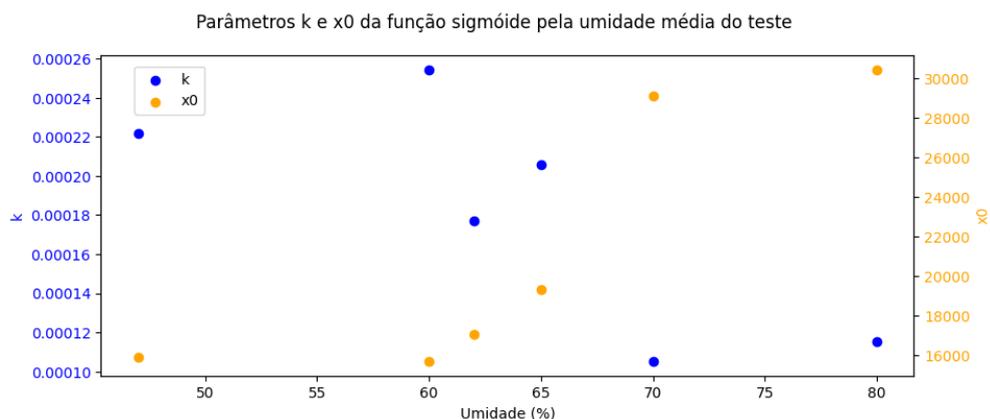


Figura 37 – Parâmetros ajustados em função da umidade nos testes sem madeira

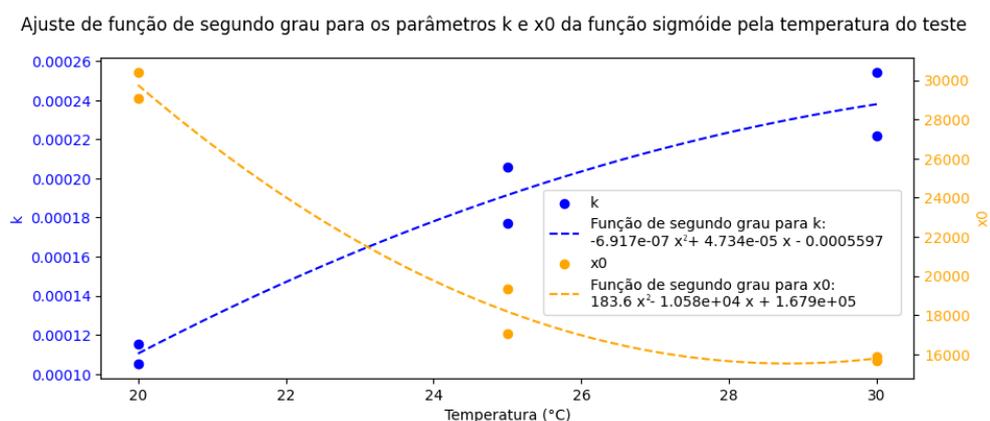


Figura 38 – Funções ajustadas para os parâmetros dos testes sem madeira

	k	x0
30°C com madeira	0,000171	18352
30°C sem madeira	0,000238	15795

Tabela 2 – Parâmetros médios da sigmoide ajustada sobre as curva de pH a 30°C, com e sem madeira

de jaca é esperado que o pH atinja o valor 6 após 14100 segundos do início do teste, enquanto esse valor cai para 12700 segundos sem a madeira, com um diferença de 1400 segundos, ou 23 minutos e 20 segundo. Em um cenário produtivo, essa diferença pode reduzir consideravelmente as perdas, sendo esse um resultado extremamente valioso. Vale ressaltar novamente que por conta do volume de dados obtidos, essa visão não possui uma alta precisão, sendo principalmente uma validação geral dos ganhos e um direcionamento para a execução de análises futuras com um maior volume de dados.

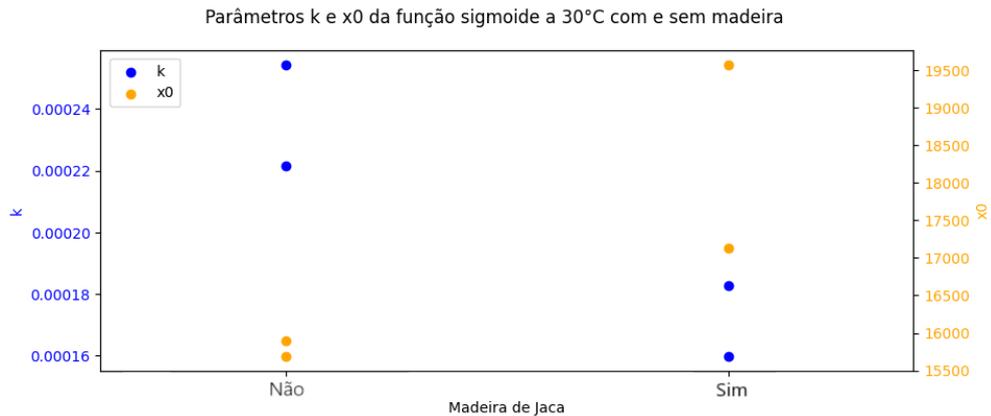


Figura 39 – Parâmetros ajustados em nos testes a 30°C

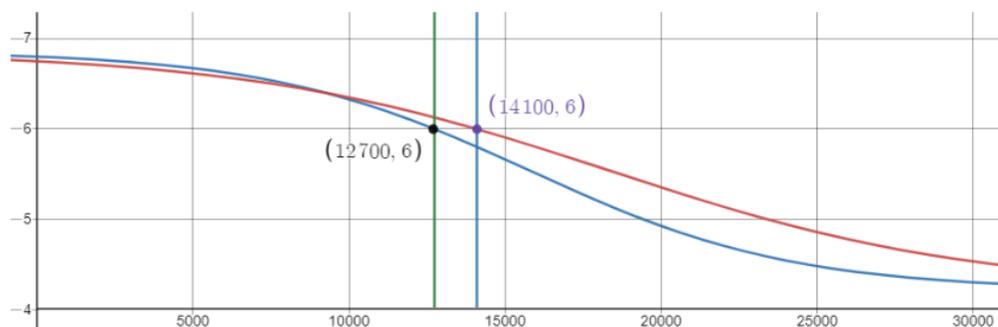


Figura 40 – Curvas de fermentação média para os testes a 30°, com e sem madeira

5.5 Conclusões do desenvolvimento

O sistema desenvolvido se mostrou funcional e capaz de exercer as funções determinadas, com um módulo de sensoriamento confiável, de baixo consumo de energia e capaz de enviar as medições sem problemas, um receptor de uso extremamente simples, bastando o conectar a tomada após as configurações iniciais para seu funcionamento e um servidor web básico, que cumpre a função de armazenar e permitir a visualização dos dados de forma rápida e confiável. Ainda assim, pelo fato do projeto ter sido desenvolvido de ponta a ponta, abordando desde o início das discussões das ideias até a obtenção de resultados e conclusões gerais sobre os dados obtidos, cada área do projeto apresenta pontos que podem ser evoluídos, melhorando ainda mais o sistema.

Com os dados obtidos nos testes em ambiente controlado, foi possível verificar a clara influência da temperatura na velocidade da fermentação nos testes, sendo possível também elaborar um modelo que permite a obtenção da curva de pH pela duração do teste para a faixa de temperatura entre 20°C e 30°C. Além disso, também foi possível verificar o ganho com o uso da madeira de jaca como um inibidor natural de fermentação. Ainda assim, é importante ressaltar que as análises realizadas apresentam conclusões

interessantes e valiosas, porém que ainda podem ser muito evoluídas, visto que o volume de dados obtidos não foi tão grande, sem englobar toda variabilidade presente no cenário real, no qual há também diferença entre as características da seiva entre coletas, havendo ainda muito espaço para melhoria e aprofundamento do estudo e seus ganhos.

Por fim, as análises executadas também podem servir como base para direcionamento de análises futuras, nas quais com a obtenção de um maior volume de dados reais, podem ser obtidos modelos mais completos e mais capazes de serem utilizados para a otimização do planejamento de coletas de seiva no cenário real.

6 Considerações Finais

Levando em conta todo desenvolvimento, testes realizados e análises efetuadas sobre os dados, conclui-se que os objetivos determinados inicialmente foram satisfatoriamente alcançados. Em um desenvolvimento que teve como ponto de partida discussões e estudos iniciais dos processos e problemas envolvidos, buscando formas de auxiliar a estabilização de uma produção de açúcar de coco em solo nacional, foi possível desenvolver um sistema de simples uso para visualização e armazenamento de dados, com fácil aplicação para execução de testes tanto em ambiente controlado, quanto no cenário real de coleta.

6.1 Contribuições

Dentro do contexto da produção do açúcar de coco, o projeto desenvolvido contribuiu principalmente por fornecer um sistema que pode ser utilizado a qualquer momento para estudo da fermentação da seiva, de maneira simples. Com o que foi desenvolvido, podem ser realizados diferentes tipos de testes em diferentes condições, tornando possível também a verificação do impacto de outras formas de inibir a fermentação, de maneira extremamente fácil.

Além disso, com o volume de dados obtidos, foi possível contribuir com a obtenção de uma métrica mais real do potencial de conservação da seiva com o uso da madeira de jaca, que pode já ter uma aplicação imediata, gerando ganhos, e com a construção do modelo que permite obter as curvas de fermentação com base na temperatura. Essas contribuições apresentam conclusões valiosas, mas que ainda podem ser muito mais aprofundadas com a obtenção de um volume maior de dados.

6.2 Perspectivas de Continuidade

Durante todo o projeto foram identificados pontos para melhoria do sistema. Neste tópico, tais pontos são abordados divididos em melhorias de hardware, melhorias de software e continuidade da aplicação e estudos

6.2.1 Melhorias de hardware

Como já mencionado durante a avaliação dos testes, um dos pontos em que o projeto precisa ser evoluído é com relação à obtenção de medidas da temperatura da própria seiva, ponto que pode ser solucionado de forma simples, adicionado um novo sensor ao módulo de sensoriamento, adaptando o código de ambos componentes do sistema, e

reestruturando os scripts no servidor web e seu banco de dados. Esse ponto acaba por ser prioritário, visto que essa modificação pode trazer dados mais completos e úteis para estudos futuros.

Além disso, com relação ao módulo de sensoriamento, outros pontos que se mostraram relevantes, mas não essenciais, são o desenvolvimento de uma melhoria do invólucro, tornando-o resistente à água, para que não ocorra a necessidade de interromper os testes em caso de chuva, a melhoria da solução de alimentação, para que ela esteja integrada ao próprio dispositivo, sem depender de uma bateria externa, a adição de uma interface visual, que permita que os parâmetros medidos sejam visualizados no próprio dispositivo, sem haver a necessidade de acessar a página para visualização, e a adição de uma solução de armazenamento de dados secundária, com uma memória local, para permitir que coletas de dados aconteçam sem o funcionamento do sistema por completo, evitando que testes sejam interrompidos por problemas de rede, por exemplo.

6.2.2 Melhorias de software

De maneira geral, o software desenvolvido para ambos dispositivos é bastante satisfatório, porém ainda há espaço para evolução. Três pontos que podem ser trabalhados são a implementação de modos de repouso no módulo de sensoriamento, que podem trazer ganhos relevantes para a economia de energia do dispositivo, facilitando a melhoria de integração da bateria ao sistema, a adição de um sistema de criptografia entre o módulo de sensoriamento e o receptor, visto que no estado atual do sistema as informações são enviadas às claras, podendo em um cenário indesejado, ter as informações manipuladas, e a implementação de uma função de calibração automática, que permita que, por meio de uma interface com o usuário, identifique as soluções de calibração em que o sensor está posicionado e atualize por conta própria os valores de calibração, tornando esse processo mais ágil.

6.2.3 Continuidade da aplicação e estudos

Como já mencionado, as análises realizadas com os dados obtidos nos testes em ambiente controlado trazem conclusões interessantes e extremamente relevantes, porém ainda carecem de um maior volume de dados para que seja possível elaborar modelos ainda mais fiéis ao comportamento do fenômeno estudado. Dessa forma, a execução de mais testes, principalmente no ambiente real de coleta, pode trazer ganhos muito grandes para esse projeto.

Dessa forma, para um aprofundamento dos resultados é interessante que seja construída uma base de dados extensa com dados obtidos em testes reais. Diferente do que acontece nos testes em ambiente controlado, além de obter uma maior gama de

temperaturas e redundância entre os testes, também será possível avaliar as diferentes condições iniciais das seivas em diferentes testes.

Isso pode ser iniciado com o dispositivo já desenvolvido e validado, mas também pode acontecer após um estudo voltado para a redução de custos de produção de outros dispositivos, para que possam ser realizados mais testes simultaneamente. Uma grande vantagem dessa segunda abordagem seria a capacidade de realizar mais de um teste com a mesma condição climática, visto que seriam realizados ao mesmo tempo, o que não acontece utilizando apenas um dispositivo.

Assim, com essa base de dados mais completa, as análises já realizadas podem servir como base de direcionamento, para obtenção de modelos mais aprofundados que permitam uma abordagem preditiva mais real, trazendo ganhos operacionais permitindo que seja feito um planejamento mais assertivo das coletas, eventualmente podendo reduzir perdas e cargas de trabalho.

De acordo:


Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho

Referências

ADAFRUIT. *DHT-sensor-library*. 2023. Acesso em: 10 de dezembro de 2023. Disponível em: <<https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library>>. Citado na página 31.

ALAASTARVES. *150 Anos de História! Incrível produção de açúcar de coco - comida de rua tailandesa*. 2022. Acesso em: 9 de dezembro de 2023. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=VxgOIFTErco>>. Citado na página 23.

ASGHAR, M. T. et al. Coconut (cocos nucifera l.) sap as a potential source of sugar: Antioxidant and nutritional properties. *Food Science & Nutrition*, v. 8, n. 4, p. 1777–1787, 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fsn3.1191>>. Citado na página 13.

DANIELLE, D. *Data Transfer from ESP32 into Database MySQL Using PHP*. 2023. Acesso em: 10 de dezembro de 2023. Disponível em: <<https://medium.com/@dwicakradanielle/data-transfer-from-esp32-into-database-mysql-using-php-3af0d7092a2a>>. Citado na página 33.

DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. LoRa technology - an overview. In: *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. IEEE, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8474715>>. Citado na página 20.

ELVINA, T.; NURMINAH, M.; KARO-KARO, T. The effect of addition natural preservatives from jackfruit wood during storage on ph, total microbes, taste and colour of palm oil sap. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. [S.l.], 2020. v. 454, n. 1, p. 012105. Citado na página 36.

ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet*. [S.l.], 2023. Version 4.3, Acesso em: 10 de dezembro de 2023. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Citado na página 29.

LAWS, C. *BH1750*. 2022. Acesso em: 10 de dezembro de 2023. Disponível em: <<https://github.com/claws/BH1750>>. Citado na página 32.

MISTRY, S. *esp32-lora-library*. 2019. Acesso em: 10 de dezembro de 2023. Disponível em: <<https://github.com/Inteform/esp32-lora-library>>. Citado na página 32.

MOUHA, R. A. R. A. Internet of things (IoT). *J. Data Anal. Inf. Process.*, Scientific Research Publishing, Inc., v. 09, n. 02, p. 77–101, 2021. Disponível em: <https://www.scirp.org/pdf/jdaip_2021042015324548.pdf>. Citado na página 19.

PAULI-YAMADA, L. F. d. et al. Parâmetros microscópicos de açúcar de coco comercializados na cidade de são paulo, brasil: identidade e qualidade. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, v. 79, n. 1, p. 1–6, dez. 2020. Disponível em: <<https://periodicos.saude.sp.gov.br/RIAL/article/view/36025>>. Citado na página 13.

PHILIPPINE NATIONAL STANDARD. *Profitability Analysis: Coconut Sap Sugar Production Module*. [S.l.], 2010. Disponível em: <<https://balinkbayan.gov.ph/wp-content/>>

[uploads/2021/01/PA_Coconut_Sap_Sugar_Production_Module2010.pdf](#)>. Citado 5 vezes nas páginas 9, 17, 18, 19 e 23.

PHILIPPINE NATIONAL STANDARD. *Draft Code of Hygienic Practice for Coconut Sap Sugar*. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://members.wto.org/crnattachments/2015/SPS/PHL/15_2906_00_e.pdf>. Citado 4 vezes nas páginas 13, 14, 23 e 37.

SAEED, M. *A gentle introduction to sigmoid function*. 2021. Acesso em: 09 de Dezembro de 2023. Disponível em: <<https://machinelearningmastery.com/a-gentle-introduction-to-sigmoid-function/>>. Citado na página 20.

SAMRIDDHI, C.; ROSHAN, D. *Coconut Sugar Market by Form (Organic, Conventional), by End User (Commercial, Residential), by Application (Food and Beverage, Cosmetics, Personal Care), by Sales Channel (Hypermarkets, Specialty Stores, E-Commerce, Business to Business): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.alliedmarketresearch.com/coconut-sugar-market-A16949>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 16.

SEMTECH CORPORATION. *LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview*. [S.l.], 2019. Acesso em: 9 de dezembro de 2023. Disponível em: <<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>>. Citado na página 20.

WEISSTEIN, E. W. *"Sigmoid Function."From MathWorld—A Wolfram Web Resource*. 2023. Acesso em: 9 de dezembro de 2023. Disponível em: <<https://mathworld.wolfram.com/SigmoidFunction.html>>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 20 e 21.