

Tecnologia Digital como Suporte para Melhoria do Processo de Produção de Açúcar de Coco

Geovani R. Yamaba¹, Tereza Cristina M. B. Carvalho¹

¹Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais – Universidade de São Paulo (USP)
Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 380, Trav. 4, 05508-020 – São Paulo – SP – Brasil
{geovani.yamaba, terezacarvalho}@usp.br

Resumo. Este trabalho apresenta um sistema de coleta de dados e monitoramento da qualidade da extração de seiva da flor do coqueiro para avaliar seu processo de fermentação e auxiliar na produção em escala do açúcar de coco no Brasil. Tal sistema constitui-se de sensores de pH, temperatura, umidade e luminosidade que, via tecnologia de comunicação LoRa e microcontroladores da classe ESP32, permite a conexão remota a um servidor web, onde são feitos o armazenamento e a visualização dos dados em tempo real. Testes e análises, baseados em ajustes de funções sigmóide às curvas de fermentação obtidas, permitiram verificar padrões de comportamento dos parâmetros estudados e direcionar otimizações de produção.

1. Introdução

O açúcar de coco é um produto que tem ganhado espaço no mercado com características que o destacam em comparação com o açúcar convencional [ASGHAR et al., 2020]. O valor do mercado desse açúcar está projetado para alcançar 408,7 milhões de dólares em 2031 e hoje, grande parte da produção está concentrada em países do Sudeste Asiático, como Filipinas, Indonésia e Tailândia, com 80% da produção das últimas décadas [Samriddhi e Roshan, 2022]. Ainda assim, no contexto atual, com produções extrativistas e artesanais nestes países, ainda há várias brechas de padronização e melhoria de qualidade dos produtos de mercado [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. Uma das grandes complicações produtivas deve-se à fermentação muito rápida da seiva no recipiente de coleta na etapa de extração, levando a perdas frequentes de matéria prima. Assim, o produto fresco extraído deve ser coletado em no máximo 5 horas e ser refrigerado ou processado, para manter um $\text{pH} \geq 6$ [PNS, 2015].

Neste contexto, em parceria com a Mombora, empresa do setor de alimentos, este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de coleta de dados e monitoramento remoto da qualidade da extração de seiva da flor do coqueiro, para entender o impacto da temperatura, umidade e luminosidade na taxa de variação do pH, e compreender melhor o fenômeno da fermentação da seiva, buscando reduzir perdas, aumentar a eficiência operacional da produção, melhorar as métricas de controle de qualidade e melhorar as condições de trabalho dos coletores, com eventual implantação de tal processo produtivo em larga escala em solo nacional, para fins comerciais.

Em relação aos trabalhos relacionados, vários trabalhos abordam o tema de aplicação de soluções IoT no cenário rural. Dentre eles, [MUANGPRATHUB, J. et al., 2019] apresentam uma solução bastante integrada, sendo esta uma base para o direcionamento da funcionalidade do sistema desenvolvido. Além deste, [ELVINA, NURMINAH e KARO-KARO, 2020] mostram que o uso da madeira de jaca é eficaz para a preservação da seiva, servindo como ponto de partida para o direcionamento dos estudos.

Esse artigo está organizado em cinco seções. A Seção 1 traz a motivação e os objetivos do trabalho. A Seção 2 dá uma visão geral sobre o processo produtivo do açúcar de coco. A Seção 3 detalha os requisitos funcionais, a arquitetura do sistema de coleta de dados e monitoramento remoto da qualidade da extração de seiva da flor do coqueiro e a tecnologia de comunicação adotada. Na Seção 4 são apresentados os resultados da análise dos dados coletados, destacando-se o impacto da temperatura no processo da coleta e o uso da madeira de jaca como um inibidor natural de fermentação. Na Seção 5, são discutidas as principais contribuições e os próximos passos do trabalho.

2. Processo Produtivo de Açúcar de Coco

O processo produtivo pode ser descrito pelos seguintes passos [PNS, 2010]:

1. **Escolha do coqueiro e manipulação da espada:** Seleção cuidadosa de coqueiros, seguida pela dobra e corte da espada para iniciar o fluxo de seiva.
2. **Coleta da seiva:** Posicionamento de um recipiente para coletar a seiva, com atenção à fermentação, recomendando coleta a cada 5 horas. É nesse ponto que o projeto em desenvolvimento desempenha um papel crucial, visando um monitoramento mais preciso e a compreensão aprofundada da influência dos parâmetros estudados.
3. **Evaporação no calor:** Aquecimento da seiva a 115°C por cerca de 3 horas.
4. **Conversão de xarope para açúcar:** Aquecimento do xarope resultante sob agitação constante, promovendo a granulação do açúcar.
5. **Peneiragem, secagem e finalização**

3. Sistema de Coleta e Monitoramento

A tabela 1 resume os principais requisitos funcionais do sistema referentes ao equipamento de coleta da seiva, receptor e dados coletados. A figura 1 contém uma representação simplificada da arquitetura geral do sistema, com base na arquitetura de três camadas de sistemas IoT [MOUHA, 2021]. O sistema de coleta e armazenamento dos dados possui três componentes principais: o módulo de sensoriamento, o receptor e o servidor web [YAMABA, 2023]. O módulo de sensoriamento coleta dados de sensores posicionados nas amostras a serem estudadas. Esses dados são encapsulados em uma mensagem estruturada e transmitida para o receptor via comunicação LoRa. A escolha da comunicação LoRa foi essencial para viabilizar o sistema devido ao seu alcance de transmissão, 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 transmitidos para um banco de dados central via 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.

Tabela 1 – Requisitos Funcionais do Sistema de Coleta e Monitoramento

Componente	Requisito Funcional
Equipamento de coleta da seiva	<ul style="list-style-type: none"> • Uso simples, com funções restritas a poucas operações. • Instalação simples com ação apenas de posicionamento no local. • Baixo consumo de energia, para prolongar a vida útil da bateria. • Possibilidade de medir: pH da seiva coletada; temperatura e umidade ambiente; luminosidade incidente no recipiente. • Comunicação em área com conectividade limitada.
Receptor	<ul style="list-style-type: none"> • Uso simples a partir de uma configuração inicial.
Dados	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização em tempo real. • Dados coletados direcionados para banco de dados para posterior análises e elaboração de modelos. • Interface de visualização simples com informações essenciais.

Por fim, os dados coletados e armazenados no banco de dados alimentam duas principais áreas de aplicação: uma página de 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. Por meio dessas aplicações dos dados é possível obter informações sobre o processo de extração da seiva do coqueiro e realizar otimizações operacionais.

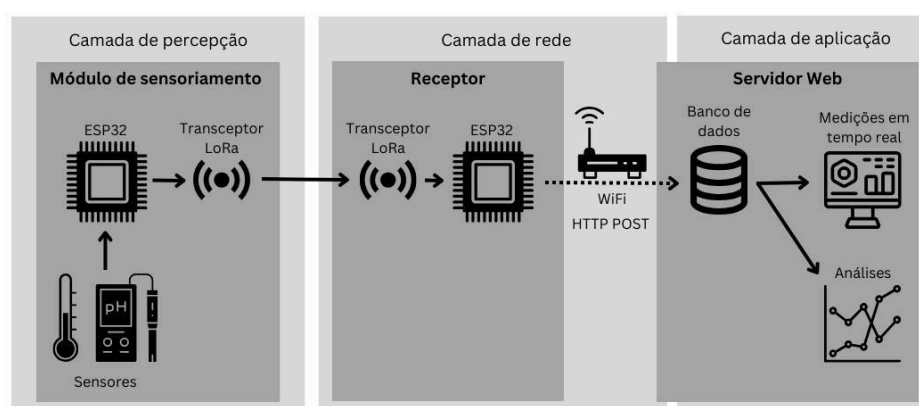


Figura 1 – Arquitetura geral do projeto (Autoria própria)

A Tecnologia de comunicação LoRa é amplamente empregada em projetos IoT [Devalal e Karthikeyan, 2018]. Ela tem como base a modulação de rádio frequência, permitindo uma comunicação de longo alcance e 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, 2019], com base em uma derivação da tecnologia *Chirp Spread Spectrum (CSS)*. Além disso, destaca-se pelo baixo custo de implementação, o que se alinha às necessidades deste trabalho. A eficiência energética é outro ponto forte e essencial para dispositivos alimentados por bateria, contribuindo com a autonomia do sistema. Sua capacidade de transmissão é limitada e a variabilidade na latência pode ser um ponto crítico. Como o sistema envolve a transmissão periódica de pequenos volumes de dados sem a exigência de baixa latência, essas desvantagens não são relevantes.

4. Resultados Obtidos

A função sigmoide é uma importante função dentro do contexto do aprendizado de máquina [SAEED, 2021] e possui um comportamento que se adapta bem a diversos fenômenos naturais, como a fermentação de seiva de flor de coqueiro.

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 trabalho com base na função sigmoide. A função adaptada é a seguinte:

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

L representa a diferença entre os dois níveis; b define um deslocamento no eixo y , visto que não há um patamar zero nas avaliações de fermentação; k 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.

Considerando essa função, foram realizadas medidas referentes a temperatura, umidade, luminosidade e pH da seiva. A Tabela 2 apresenta os testes realizados com os respectivos parâmetros da sigmoide ajustada sobre a curva de pH real.

Tabela 2 – Testes e parâmetros da sigmoide ajustada sobre a curva de pH real

	Temp. média (°C)	Umidade média (%)	Lumino-sidade	Madeira	L	b	k	x_0
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

O fator de maior impacto na fermentação foi a temperatura (testes equivalentes com mesma cor na Tabela 2). Além da temperatura, é clara a diferença entre os cenários com e sem o uso da madeira de jaca como inibidor natural de fermentação. Para formalizar os ganhos obtidos, foi realizado o cálculo da média dos parâmetros obtidos, Figura 2, para obter uma curva aproximada que representa os fenômenos com base nos dados existentes, para os dois casos. Houve um ganho de cerca de 23 minutos até a seiva alcançar o pH=6, melhoria relevante para a otimização da produção.

Com os dados obtidos nos testes, foi possível verificar a clara influência da temperatura na velocidade da fermentação da seiva, 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, foi possível verificar o ganho com o uso da madeira de jaca como um inibidor natural de fermentação [ELVINA, 2020]. É importante ressaltar que as análises realizadas apresentam conclusões interessantes e valiosas, que permitem direcionar os próximos passos de melhoria do sistema.

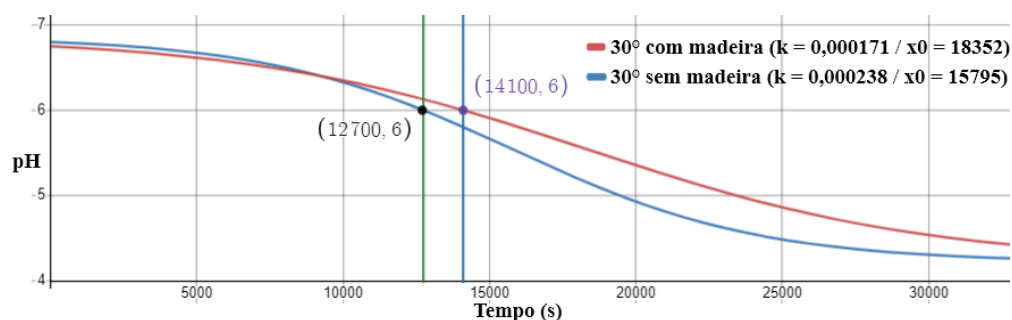


Figura 2 – Curvas de fermentação média para os testes a 30°, com e sem madeira

5. Considerações Finais

Neste projeto foi possível desenvolver um módulo de sensoriamento remoto portátil de baixo custo, capaz de coletar dados e permitir análises que tragam ganhos para o ambiente produtivo. O dispositivo conecta-se a uma interface central de monitoramento, permitindo aos produtores visualizar em tempo real o pH do produto e os outros parâmetros complementares. A solução desenvolvida foi testada e é eficaz mesmo em áreas remotas, sem acesso direto à rede, utilizando tecnologias de comunicação de longo alcance para permitir o armazenamento dos dados em um banco de dados para análises mais detalhadas com qualidade, alcançando TRL 5 para a solução desenvolvida.

Dentro do contexto produtivo, o sistema desenvolvido permite a execução de teste e a coleta de dados com alta confiabilidade, sendo possível avaliar diferentes condições ambiente e parâmetros de conservação com muita facilidade. Além disso, com as análises realizadas foi possível quantificar o ganho obtido pelo uso da madeira de jaca como inibidor de fermentação e estruturar uma forma de avaliar as condições quantitativamente com base na função sigmóide usada no aprofundamento dos estudos.

Os resultados obtidos são muito relevantes, porém é de suma importância que sejam realizados mais testes, a fim de aprofundar e validar os resultados já obtidos de maneira mais assertiva. Além disso, durante todo o projeto foram identificados pontos para melhoria do sistema, sendo os principais a adição de um sensor de temperatura da seiva, a implementação de modos de repouso e criptografia entre as partes e o desenvolvimento de uma função de calibração automática do sensor de pH.

Agradecimentos: Agradecemos a Mombora, startup do setor de alimentos, pelo suporte a esse projeto e a FAPESP Projeto 2018/23097-3 pelo apoio recebido..

Referências

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>>.
- 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>>.
- 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.
- 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>.
- 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>>.
- PNS. *Profitability Analysis: Coconut Sap Sugar Production Module*. PHILIPPINE NATIONAL STANDARD. [S.l.], 2010. Disponível em:
<https://balinkbayan.gov.ph/wp-content/uploads/2021/01/PA_Coconut_Sap_Sugar_Production_Module2010.pdf>.
- PNS. *Draft Code of Hygienic Practice for Coconut Sap Sugar*. PHILIPPINE NATIONAL STANDARD. [S.l.], 2015. Disponível em:
<https://members.wto.org/crnattachments/2015/SPS/PHL/15_2906_00_e.pdf>.
- SAEED, M. *A gentle introduction to sigmoid function*. 2021. Acesso em: 09/12/2023. Disponível em: <<https://machinelearningmastery.com/a-gentle-introduction-to-sigmoid-function/>>.
- SAMRIDDHI, C.; ROSHAN, D. *Coconut Sugar Market by Form, by End User, by Application, by Sales Channel: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031*. [S.l.], 2022. Disponível em:
<<https://www.alliedmarketresearch.com/coconut-sugar-market-A16949>>.
- SEMTECH. *LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview*. [S.l.], 2019. Acesso em: 9/12/2023. Disponível em: <<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>>.
- MUANGPRATHUB, J. et al. (2019). IoT and agriculture data analysis for smart farm. *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 156, p. 467–474). Elsevier BV. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.011>>
- YAMABA, G. R. *Sistema de Monitoramento da Qualidade da Seiva Extraída da Flor do Coqueiro para Produção de Açúcar de Coco*, 58 p. Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da USP, São Paulo - SP, Brasil.