

MONITORAMENTO INTELIGENTE E AUTÔNOMO DE COLMEIAS: UMA FERRAMENTA DE PRECISÃO PARA A APICULTURA EM SÃO RAIMUNDO NONATO/PI

Aline Simões dos Santos

Docente – IFPI *Campus* São Raimundo Nonato
E-mail: aline.simoes@ifpi.edu.br

Vitor Emanuel Paes de Castro Miranda

Discente – IFPI *Campus* São Raimundo Nonato
E-mail: casrn.2025115TSIT0014@aluno.ifpi.edu.br

Jorge Felipe Damasceno de Oliveira

Discente – IFPI *Campus* São Raimundo Nonato
E-mail: casrn.2022115lfis0017@aluno.ifpi.edu.br

Caio Vitor Dias dos Santos

Discente – IFPI *Campus* São Raimundo Nonato
E-mail: 2025115ISINF0035@aluno.ifpi.edu.br

Maria Clara Duarte da Silva

Discente – IFPI *Campus* São Raimundo Nonato
E-mail: casrn.2025115ISINF0040@aluno.ifpi.edu.br

RESUMO

A apicultura no Piauí configura-se como uma atividade econômica de grande relevância, posicionando o estado como o segundo maior produtor de mel do Brasil, com o município de São Raimundo Nonato emergindo como o quarto maior produtor nacional. Contudo, essa produção, alicerçada na agricultura familiar, é severamente ameaçada por vulnerabilidades climáticas do semiárido, em especial o fenômeno da "Seca Verde", que, ao impossibilitar a floração, causa fome nas colmeias e perdas produtivas de 50% a 80%. Para enfrentar este desafio, este projeto desenvolveu e validou em laboratório um protótipo de baixo custo para Apicultura de Precisão. O sistema modular e autônomo, alimentado por energia solar, é baseado no microcontrolador ESP32-C3 SuperMini e integra sensores para monitoramento não invasivo. O sensor AHT20 coleta dados de temperatura e umidade internas, atuando como um indicador precoce de estresse da colônia. Enquanto o sensor de áudio digital INMP441 captura o zumbido das abelhas, permitindo, por meio de análise espectral e futuramente com inteligência artificial, a detecção preditiva de eventos críticos como a perda da rainha (orfanização) e a enxameação. Conclui-se que o protótipo, tecnicamente validado, representa uma ferramenta estratégica para a transição de um manejo reativo para um manejo preditivo. Ao fornecer alertas precisos, a tecnologia poderá mitigar perdas produtivas e suprir a carência de assistência técnica, otimizando a gestão apícola na agricultura familiar. Os próximos passos envolvem a coleta de dados em campo para treinamento de modelos de machine learning e a posterior transferência dessa tecnologia aos apicultores da região.

Palavras-chave: Apicultura; Monitoramento; ESP32; Aquisição de Dados; Prototipagem.

1 INTRODUÇÃO

A apicultura no Piauí transcende o status de atividade agrícola complementar para se tornar um pilar estrutural da economia do estado. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) posicionam o Piauí como o segundo maior produtor de mel do Brasil e o maior produtor na região Nordeste, posto a qual é líder há oito anos consecutivos (MORENO, 2025). Este crescimento é notável: entre 2014 e 2023, a produção piauiense aumentou 171,7%, um ritmo muito superior à média nacional de 66,8% (FREITAS, 2024).

Dentro do cenário estadual, o município de São Raimundo Nonato (SRN), localizado no Território Integrado da Serra da Capivara, emerge como o epicentro da cadeia produtiva. SRN não é apenas o maior produtor do Piauí, mas figura como o quarto maior município produtor do Brasil, com uma produção anual registrada de 922,4 toneladas. Em uma década, o município saltou da 384^a posição nacional para a 4^a, um incremento de 4.483% (MORENO, 2025).

O impacto desta atividade é primariamente socioeconômico, alicerçado na agricultura familiar. Estudos na região indicam que a apicultura colabora de forma expressiva para a renda familiar (cerca de R\$ 5.000 anuais líquidos para 80% dos apicultores) e, crucialmente, garante a permanência do agricultor e família no campo (CARVALHO et al., 2018, p. 7). No entanto, esta potência produtiva, baseada no bioma da Caatinga, é extremamente vulnerável a desafios climáticos, notadamente períodos de estiagem (SILVA, 2024) e o fenômeno da "Seca Verde".

A "Seca Verde" ocorre quando chuvas irregulares mantêm a paisagem verde, mas são insuficientes ou mal distribuídas para induzir a floração das espécies apícolas (ESTRÊLA, 2025). Para o apicultor que depende do manejo visual, a colônia passa fome de forma invisível, levando a perdas que podem chegar de 50% a 80% da produção (INFONEWSS, 2025). Adicionalmente, o manejo tradicional é invasivo, e os apicultores locais carecem de maior assistência técnica (SILVA, 2024), dificultando a diversificação da produção para itens de maior valor agregado, como própolis ou geleia real (CARVALHO et al., 2018).

Neste contexto, a Apicultura de Precisão, definida pelo uso de tecnologias da Internet das Coisas (IoT) para monitoramento em tempo real (KVIESIS et al., 2023), surge como uma solução estratégica. Este projeto de extensão tem como objetivo o desenvolvimento, a construção e a validação laboratorial de um protótipo de monitoramento de colmeias de baixo

custo, autônomo e robusto, projetado especificamente para mitigar as vulnerabilidades da apicultura familiar no semiárido piauiense, fornecendo dados estratégicos para o manejo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto foi estruturado em etapas de desenvolvimento de hardware, software embarcado e validação em bancada. O sistema foi concebido de forma modular, composto por dois módulos físicos distintos, ambos encapsulados em cases impressos em 3D com filamento ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), escolhido por sua maior resistência térmica e a intempéries em comparação ao PLA (Polylactic Acid), visando a exposição ao sol do semiárido.

O primeiro é o módulo de alimentação energética, projetado para autonomia em campo. Ele integra uma mini placa solar (5-6V), um circuito de carregamento e proteção para bateria de íon-lítio (baseado no CI TP4057) e um conversor STEP-UP para fornecer uma tensão estável de 5V aos componentes. A autonomia é garantida pela estratégia de deep sleep (sono profundo) do microcontrolador, que consome apenas cerca de 43 μ A em repouso (NOLOGO.TECH, 2024).

O segundo é o módulo de aquisição de dados, baseado no microcontrolador *ESP32-C3 SuperMini*. Este componente foi selecionado por seu baixo custo, capacidade de processamento (RISC-V 32-bit, 160 MHz) e periféricos Wi-Fi/Bluetooth integrados, além do seu otimizado baixo consumo. A este módulo foram conectados três periféricos centrais:

1) Um sensor de temperatura e umidade AHT20, comunicado via I2C e escolhido por sua alta precisão (Temperatura: ± 0.3 °C; Umidade: ± 2 %) e, crucialmente, sua ampla faixa de operação (-40 °C a 85 °C), adequada ao ambiente interno da colmeia no semiárido.

2) Um sensor de áudio digital INMP441, um microfone MEMS omnidirecional com interface I2S. A escolha pelo I2S digital foi uma decisão técnica para evitar a suscetibilidade a ruído e interferência eletrônica comuns em microfones analógicos, garantindo um áudio limpo com alta relação sinal-ruído (SNR de 61 dBA), essencial para a análise acústica.

3) Um módulo de cartão micro-SD para armazenamento local (datalogging), contornando a necessidade de conectividade de internet no apiário.

O protótipo foi concebido para instalação não invasiva, com o módulo de energia posicionado sobre a tampa da colmeia e o módulo de sensores na parte inferior da tampa (interno), conectados por um cabo USB-C. A fase metodológica final consistiu em testes de

funcionalidade em bancada, validação da compatibilidade física com caixas padrão (Langstroth para *Apis mellifera* e caixas para abelhas sem ferrão).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta fase do projeto são a validação técnica e funcional do protótipo. Os testes de funcionalidade em bancada validaram o correto funcionamento de todos os subsistemas: o módulo de energia carregou a bateria e forneceu tensão estável; o microcontrolador *ESP32-C3 SuperMini* realizou com sucesso a leitura dos dados do sensor AHT20 (temperatura e umidade) e a captura de áudio do INMP441 (via I2S); e os dados foram corretamente registrados no cartão micro-SD. O design físico mostrou-se compatível com os modelos de caixa utilizados na região. Conclui-se, portanto, que o protótipo está funcional e pronto para a fase de coleta de dados em campo.

A discussão sobre o potencial deste protótipo se baseia na correlação dos dados coletados com os principais desafios de manejo identificados na literatura. O monitoramento da homeostase interna (temperatura e umidade) pelo AHT20 atua como um indicador precoce de estresse da colônia. As abelhas *Apis mellifera*, por exemplo, mantêm ativamente a temperatura do ninho de cria (tipicamente 32-35 °C). Uma queda abrupta na temperatura interna pode indicar não apenas uma colônia fraca ou doente, mas, crucialmente, fome – a incapacidade de gerar calor metabólico por falta de alimento (mel), um sintoma direto da "Seca Verde" que seria imperceptível externamente.

O diferencial do protótipo reside na análise acústica. O zumbido da colmeia é uma forma de comunicação complexa. A literatura científica sobre o tema demonstra que a análise de espectrogramas pode diferenciar estados da colônia e que a banda de frequência entre 100 Hz e 600 Hz é a mais rica em informações para essa classificação (Abdollahi, Giovenazzo e Falk, 2022). A captura de áudio limpo pelo INMP441 é projetada para esta análise, permitindo a detecção de dois eventos catastróficos para o apicultor:

1. *Perda da Rainha (Orfanização)*: A ausência da rainha leva ao colapso da colônia, mas produz uma assinatura acústica distinta e detectável. Sistemas baseados em Inteligência Artificial já alcançam precisão de 97% a 99% na detecção deste evento (Cejrowski et al. 2018).
2. *Enxameação (Swarming)*: A enxameação representa a perda de cerca de 50% da força de trabalho e da produção de mel. Este evento é precedido por comportamentos e sons

específicos, como o "piping" da rainha, que são acusticamente detectáveis (Cejrowski et al. 2018).

O protótipo, portanto, permite a transição de um manejo reativo (baseado na descoberta da perda) para um manejo preditivo (baseado em alertas). Esta abordagem supre a lacuna de assistência técnica, otimiza a capacidade de gestão do apicultor de São Raimundo Nonato e mitiga perdas produtivas evitáveis.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou o desenvolvimento e a validação laboratorial de um protótipo funcional, autônomo e de baixo custo para o monitoramento inteligente de colmeias. A solução técnica, baseada no microcontrolador *ESP32-C3 SuperMini* e nos sensores AHT20 e INMP441, provou ser viável e robusta.

O sistema foi justificado como uma ferramenta de Apicultura de Precisão vital para o contexto de São Raimundo Nonato/PI, o quarto maior polo de produção de mel do Brasil, oferecendo uma resposta direta às vulnerabilidades climáticas do semiárido (como a "Seca Verde") e aos desafios do manejo em larga escala na agricultura familiar.

Os próximos passos consistem na implantação em campo para a coleta de dados sazonais, especificamente temperatura, umidade e áudio, que serão utilizados para treinar uma Inteligência Artificial (IA) com *Machine Learning* para a classificação automática de eventos como *orfanização* e *enxameação*. Posteriormente, este modelo de IA será a base para desenvolver um aplicativo que alerte o apicultor em tempo real sobre esses eventos críticos. Como um projeto de extensão, a fase final vislumbra a transferência de tecnologia, realizando workshops em parceria com as instituições locais, capacitando os apicultores da região com a ferramenta completa desenvolvida para a realidade da região.

REFERÊNCIAS

Abdollahi, M.; Giovenazzo, P.; Falk, T.H. Automated Beehive Acoustics Monitoring: A Comprehensive Review of the Literature and Recommendations for Future Work. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3920. <https://doi.org/10.3390/app12083920>.

Cejrowski, Tymoteusz & Szymanski, Julian & Mora, Higinio & Gil, David. (2018). Detection of the Bee Queen Presence Using Sound Analysis. 10.1007/978-3-319-75420-8_28.

ESTRÊLA, Maria Clara. Semarh avalia os impactos da Seca Verde em 19 municípios piauienses. Portal O Dia, Teresina, 20/03/2025. Disponível em: [Semarh avalia os impactos da Seca Verde em 19 municípios piauienses - Portal O Dia](#). Acesso em: 02 de novembro de 2025.

FREITAS, Lyza. Em 10 anos, produção de mel no PI triplica e estado é 2º maior produtor do Brasil. Investe Piauí, Teresina, 23/09/2024. Disponível em: [Em 10 anos, produção de mel no PI triplica e estado é 2º maior produtor do Brasil - Investe Piauí](#). Acesso em: 02 de novembro de 2025.

KVIESIS et al. Bee colony remote monitoring based on IoT using ESP-NOW protocol. **PeerJ**, v. 9, p. e1363–e1363, 27 abr. 2023.

MORENO, Breno. Piauí mantém liderança na produção de mel no Nordeste pelo 8º ano consecutivo. Cidade Verde, Picos, 18/09/2025. Disponível em: [Piauí mantém liderança na produção de mel no Nordeste pelo 8º ano consecutivo - Cidadeverde.com](#). Acesso em: 02 de novembro de 2025.

NOLOGO.Tech. ESP32C3SuperMini Hardware Description. *Nologo.tech*, 2024. Disponível em: <https://www.nologo.tech/en/product/esp32/esp32c3SuperMini/esp32C3SuperMini.html>. Acesso em: 01 nov. 2025.

“Seca Verde” provoca perda de cerca 80% da safra em Geminiano, no Piauí. Info Newss, 2025. Disponível em: [“Seca Verde” provoca perda de cerca 80% da safra em Geminiano, no Piauí - Info Newss](#). Acesso em: 02 de novembro de 2025.

SILVA, Victor Virgino de Sousa e. Estratégias para mitigação dos impactos do clima semiárido na apicultura desenvolvida em Oeiras, Piauí, Brasil / Victor Virginio de Sousa e Silva. -- 2024. 65 f.