



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



Maestría en Ciencias De la Computación

Tesis:

Sistema de monitoreo de variables físicas de colmenas apícolas utilizando reconocimiento de patrones

Estudiante:

Carlos Humberto Montaña Alcalá

Director de tesis: **Rafael Armando Galaz Bustamante**

Codirector de tesis: **María Trinidad Serna Encinas**

Hermosillo, Sonora, México

June 20, 2025

Resumen

La apicultura es una actividad esencial para la producción de miel y otros productos derivados de las abejas, así como para la polinización de plantas. En México, la apicultura juega un papel significativo, siendo el noveno productor de miel a nivel mundial. El estado de Sonora, aunque contribuye con solo el 7% de la producción nacional de miel, destaca por la utilización de sus colmenas, principalmente para la polinización de cultivos. Para asegurar la salud y producción eficiente de las colmenas, es necesario contar con un monitoreo constante, que tradicionalmente se realiza de manera manual, con un apicultor visitando la colmena cada 8 a 15 días en búsqueda de anomalías y enfermedades. Con el aumento de colmenas, este proceso manual puede volverse ineficiente y tardado, añadiendo requerimientos de logística y el riesgo de no monitorear las colmenas en el tiempo recomendado. Esta investigación propone el desarrollo de un sistema de monitoreo de colmenas apícolas utilizando técnicas de Internet de las Cosas (IoT), con el fin de mejorar la eficiencia y efectividad del monitoreo. El sistema integrará sensores para medir variables como temperatura, humedad, peso y audio, y empleará un algoritmo de reconocimiento de patrones para identificar eventos de interés que puedan requerir la atención del apicultor. Se desarrollará una aplicación móvil para la visualización de los datos recopilados y los resultados del procesamiento. Este sistema tiene como objetivo proporcionar a los apicultores información en tiempo real sobre el estado de sus colmenas, mejorando así la toma de decisiones y optimizando el manejo de las colmenas.

Índice general

Introducción	1
1. Introducción y antecedentes	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Preguntas de investigación	3
1.3.1. Principal	3
1.3.2. Específicas	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. General	4
1.4.2. Específicos	4
1.5. Justificación de la investigación	4
1.6. Alcances y delimitaciones	4
1.6.1. Alcance	4
1.6.2. Delimitaciones	5
1.7. Metodología de trabajo	5
1.8. Organización de la tesis	5
1.9. Cronograma	6
2. Estado del arte	7
2.1. Marco teórico	7
2.1.1. Introducción	7
2.1.2. Apicultura	7
2.1.3. Abejas	7
2.1.4. Colmena	8
2.1.5. Temperatura de la colmena	8

2.1.6. Humedad de la colmena	9
2.1.7. Peso de la colmena	9
2.1.8. Enjambrado	9
2.1.9. Internet e IoT	9
2.1.10. Inteligencia artificial	11
2.1.11. Minería de datos	11
2.2. Trabajos relacionados	11
2.2.1. Introducción	11
2.2.2. Nodos de sensores	12
2.2.3. Sistema de transmisión de datos	13
2.2.4. Manejo de energía	14
2.2.5. Procesamiento de datos	15
2.2.6. Conclusión	16
2.3. Métodos y herramientas	17
2.3.1. Sensor DHT22	17
2.3.2. Celda de carga y módulo HX711	17
2.3.3. Controlador ESP32	19
2.3.4. Micrófono INMP441	22
3. Análisis de requerimientos y diseño del sistema	24
3.1. Arquitectura del sistema	24
3.2. Diseño de la base de datos	24
3.3. Microcontrolador del sistema	24
3.4. Diseño electrónico	24
3.5. Diagrama electrónico del sistema	25
3.6. Inteligencia artificial	25

Introducción

La apicultura es la actividad que se encarga de la crianza y explotación de abejas, de la cual dependen miles apicultores a nivel mundial, y más de 14 mil apicultores a nivel nacional [1]. Las colmenas apícolas tienen 2 funciones, la primera es la elaboración de productos provenientes de las abejas, entre estos se encuentra el polen, los propóleos, la cera, la jalea real y, el principal producto, la miel. Además, las colmenas brindan un servicio de polinización a las plantas con flor que se encuentren a los alrededores de la colmena [2]. Como ya se mencionó una de las funciones de las colmenas es la polinización, este proceso es fundamental para la reproducción de plantas con flor, y se realiza al momento en el que una abeja lleva polen de la parte masculina de una planta a una parte femenina [2].

Capítulo 1

Introducción y antecedentes

1.1. Antecedentes

En cuanto al panorama nacional y según la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), México se posicionó como el noveno productor de miel a nivel mundial [3], contando con más de 2 millones de colmenas registradas en 2018 [4]. La SADER tiene clasificadas 5 regiones apícolas en el territorio mexicano: región Norte, región Golfo, región Costa del Pacífico, región Altiplano y región Sureste o península de Yucatán; siendo esta última la de mayor producción, con un 32 % de la producción nacional, en contraste con la región Norte, que produce un 7 % [4]. Además de la producción de miel, las colmenas cumplen el rol de brindar el servicio de polinización. Tanto la producción bovina como la agricultura en general necesitan de este servicio. Por este motivo, aproximadamente 150 000 colmenas están destinadas a la polinización de plantas para consumo de ganado y producción agrícola [4]. En cuanto al panorama estatal, Sonora se encuentra dentro de la región Norte [5], participando con el 7 % de la producción de miel del país. Sin embargo, este no es el fin principal de la apicultura sonorenses, ya que, así como en varios estados de la región Norte, el objetivo principal de las colmenas es la polinización de cultivos. Sonora contaba con 24 000 colmenas registradas en 2008 para este fin [5]. Otro factor que se añade al peso de la importancia de la polinización es el sector de la producción bovina, Sonora es el principal productor, con una producción bruta total de \$4 150 millones de MXN en 2019, correspondiente a aproximadamente un 34 % de la producción nacional [6]. Esta conexión entre la apicultura, agricultura y ganadería resalta la necesidad de mantener un monitoreo constante de las colmenas apícolas y de optimizar dicho monitoreo, una de las opciones para realizar esto es mediante un sistema automático como el presentado en [7] que se utilice para la medición de variables físicas relevantes de la colmena, tomando en cuenta la adición de un proyecto como el presentado en [8] que contemple un sistema informático para el procesamiento y visualización de los datos. El monitoreo de colmenas apícolas mediante técnicas de Internet de las cosas (IoT) ha ganado relevancia en los últimos años. Actualmente, existen diversas opciones comerciales y propuestas de diseño de sistemas de monitoreo, reflejando el interés en las ventajas que ofrece un sistema automatizado. Las opciones comerciales son consideradas como alternativas confiables, ya sea como productos independientes, como [9], o como sistemas con versatilidad mínima pero aplicables en un

amplio rango de situaciones, con [10] como ejemplo. Sin embargo, estas opciones tienden a requerir un presupuesto más elevado y presentan limitaciones en cuanto a la personalización, ya que suelen carecer de modularidad. En el ámbito de la investigación pública, se distinguen principalmente dos tipos de proyectos. Por un lado, proyectos diseñados específicamente para zonas particulares, como es el caso de [7]. Por otro lado, proyectos que se centran en aspectos muy específicos del sistema de monitoreo, tal como lo hace el sistema de reconocimiento de audio descrito en [11].

1.2. Planteamiento del problema

Para asegurar la salud y producción eficiente de las colmenas es necesario contar con un monitoreo constante, este proceso se realiza de manera manual, con un apicultor en sitio, que visita la colmena en un periodo de 8 a 15 días en búsqueda de anomalías y enfermedades [12].

Conforme se incrementa la producción de miel, el proceso de monitoreo manual se puede volver ineficiente y tardado, añadiendo requerimientos de logística y el riesgo de que no se monitoreen las colmenas en el tiempo recomendado.

Abordar este problema podría significar en beneficios de logística en la producción apícola, así como brindar una perspectiva general de todas las colmenas.

1.3. Preguntas de investigación

1.3.1. Principal

¿Cómo implementar un sistema de monitoreo, procesamiento y visualización de las variables de temperatura, humedad, peso y audio de colmenas apícolas?

1.3.2. Específicas

1. ¿Cómo implementar un sistema de monitoreo portátil de temperatura, humedad, peso y audio que sea efectivo y compatible con las necesidades específicas de las colmenas apícolas en Sonora?
2. ¿Cómo implementar un sistema de reconocimiento de patrones que procese los datos recopilados por el sistema de monitoreo y reconozca eventos de interés?
3. ¿Qué características y funcionalidades son necesarias para el desarrollo de un servicio que procese los datos recopilados por el sistema de monitoreo?
4. ¿Cómo se puede diseñar una aplicación móvil que brinde una interfaz para visualizar los datos recopilados por el sistema de monitoreo y los resultados del sistema de reconocimiento de patrones?

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Desarrollar un sistema de monitoreo de temperatura, humedad, peso y audio de una colmena apícola que cuente con la capacidad de procesar y mostrar la información, así como de integrar un sistema de reconocimiento de patrones para alertar sobre posibles situaciones que requieran la atención del apicultor.

1.4.2. Específicos

- Implementar un sistema de monitoreo portátil de la temperatura, humedad, peso y audio de tipo "Internet de las cosas".
- Implementar un sistema de reconocimiento de patrones sobre las variables medidas.
- Desarrollar un servicio para procesar los datos del sistema de monitoreo.
- Desarrollar una aplicación móvil que muestre los datos recopilados y los resultados del sistema de reconocimiento de patrones.

1.5. Justificación de la investigación

Si bien, no es posible eliminar la visita de un apicultor, es posible mejorar el proceso añadiendo un sistema monitoreo automático que permita a los apicultores conocer el estado de las colmenas en tiempo real, así como desplegar alertas que permita a los apicultores conocer de posibles eventos de interés y programar un monitoreo oportuno a la colmena.

El principal aporte de este proyecto es la adición de un algoritmo de reconocimiento de patrones para detectar eventos de interés.

1.6. Alcances y delimitaciones

1.6.1. Alcance

La implementación de un sistema de monitoreo IoT, el desarrollo de una aplicación móvil para visualizar la información, la creación de un algoritmo de reconocimiento de patrones de las variables medidas por el sistema y un software de procesamiento en la red.

1.6.2. Delimitaciones

- **Sistema de Monitoreo Existente:** El diseño del sistema de monitoreo se basará en uno previamente definido. Se realizarán mejoras y adaptaciones según sea necesario.
- **Sistema informático:** El sistema informático se desarrollará tomando como base sistemas similares previamente implementados.
- **Área Geográfica y Condiciones Atmosféricas:** La geografía y condiciones atmosféricas se limitarán a las colmenas apícolas ubicadas en las colindantes al municipio de Hermosillo.

1.7. Metodología de trabajo

La metodología consiste en realizar las siguientes etapas:

1. Revisión de bibliografía relevante para tomar referencia sobre el diseño del sistema, incluyendo los temas de desarrollo móvil, desarrollo backend, internet de las cosas (IoT), apicultura y algoritmos de reconocimiento de patrones.
2. Toma de información sobre los requerimientos necesarios para que el sistema se adapte correctamente a las colmenas apícolas Sonorenses.
3. Desarrollo del sistema de monitoreo incluyendo elección de sensores, fuentes de energía y controlador.
4. Desarrollo del servicio de procesamiento, incluyendo procesamiento de los datos del sistema de monitoreo, reconocimiento de patrones y almacenamiento de datos.
5. Desarrollo de una aplicación móvil para visualizar los datos proporcionados por el servicio.
6. Prueba del sistema y análisis de los resultados obtenidos.

1.8. Organización de la tesis

- Capítulo 1: Introducción y antecedentes
- Capítulo 2: Marco teórico y estado del arte
- Capítulo 3: Análisis de requerimientos y diseño
- Capítulo 4: Implementación, pruebas y resultados
- Capítulo 5: Conclusiones

1.9. Cronograma

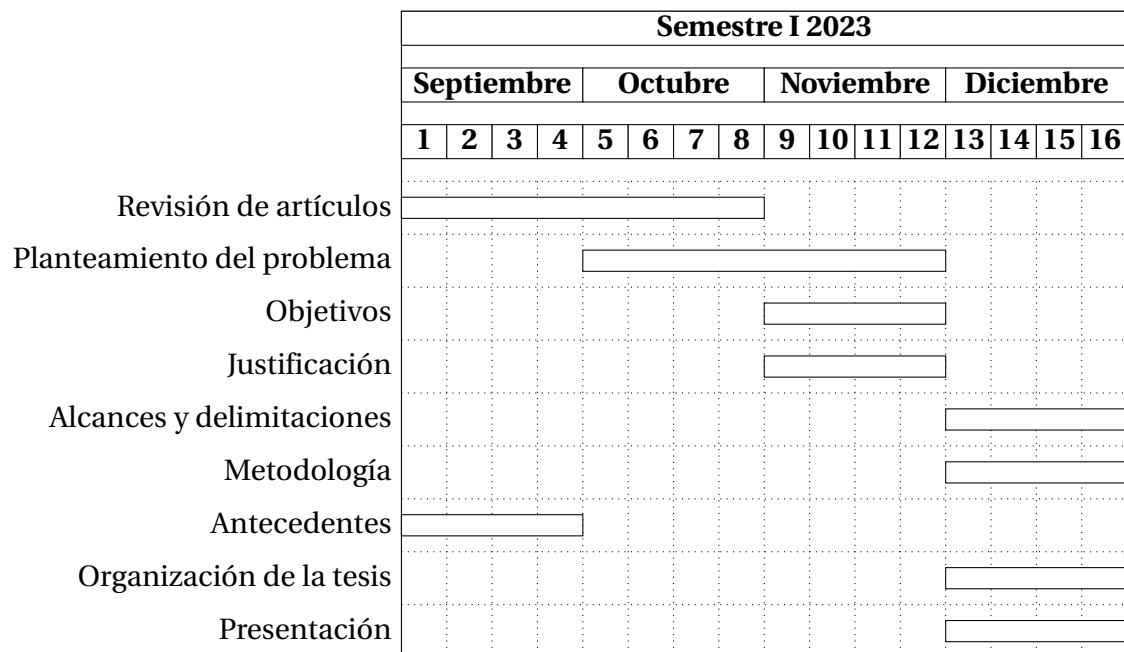


Figura 1.1: Cronograma de actividades del Semestre I 2023.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Marco teórico

2.1.1. Introducción

La implementación de la infraestructura de telecomunicaciones ha transformado numerosos aspectos de la vida cotidiana y el ámbito industrial, dando lugar a innovaciones que facilitan la comunicación y el control de diversos sistemas. Uno de estos avances es el Internet de las Cosas (IoT), que conecta objetos físicos a la red, permitiendo su monitoreo y control a través de dispositivos electrónicos y software. En este contexto, en el área de la apicultura se han adoptado tecnologías IoT para mejorar la gestión y el monitoreo de las colmenas, creando lo que se conoce como colmenas inteligentes.

En este capítulo se ofrece un marco teórico sobre los conceptos clave del internet, IoT y su aplicación en la apicultura. Se explora la arquitectura IoT, desglosada en sus siete capas fundamentales, y se examina la interacción de los sensores en estos sistemas. Además, se profundiza en el uso de IoT en las colmenas, destacando su capacidad para monitorear parámetros críticos como la temperatura, la humedad y el peso de la colmena, así como para detectar el enjambrado a través del análisis de sonidos específicos. También se proporciona una visión general sobre la inteligencia artificial y su potencial integración en sistemas IoT para optimizar el control y análisis de datos en la apicultura.

2.1.2. Apicultura

Se refiere a la crianza y explotación de abejas, de las cuales se obtienen productos como miel, cera y polen, y que al mismo tiempo realizan el servicio de polinización de plantas.

2.1.3. Abejas

Se refiere a un insecto social que durante su ciclo de vida se encarga de producir miel, cera y panal y polinizar plantas para apoyarlas en su reproducción, por lo cual se les considera de los

insectos más importantes del planeta. [13]

2.1.4. Colmena

Una abeja no puede sobrevivir de manera individual, una abeja obrera no se puede reproducir y una abeja reina no puede construir o mantener una colmena ya que la estructura social de las abejas requiere de a las obreras, las reinas y los drones para sobrevivir, por lo cual se considera a la misma como un organismo independiente. [13] En la figura 2.1 se muestra una imagen ilustrativa de las 3 castas de abeja.

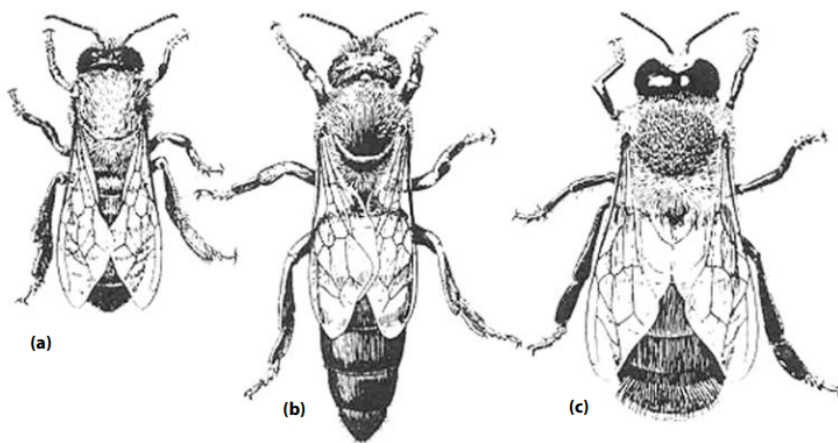


Figura 2.1: Castas de abejas. [13]

Como se observa en la figura 2.1, las castas de abejas son las siguientes:

- a) **Obreras:** Estas se encargan de todas las tareas no relacionadas con la reproducción, incluyendo la construcción del panal, la recolección de polen, la producción de miel, entre otras actividades vitales para la colmena.
- b) **Reinas:** Son la única hembra completa de la colonia; su única responsabilidad es reproducirse y poner huevos.
- c) **Drones:** Similar a la reina; su única responsabilidad es reproducirse con reinas de otras colonias.

2.1.5. Temperatura de la colmena

Una colmena debe de mantener una temperatura cercana a los 34 grados centígrados, para lograr esto pueden implementar ciertos mecanismos de regulación de temperatura. [13] Cuando las abejas necesitan elevar la temperatura, generan una capa de abejas vivas alrededor de la reina, después proceden a vibrar con el objetivo de producir calor. Para este proceso es necesario que la colmena cuente con suficiente alimento, además, se apoya del aislamiento de

la colmena, ya sea natural o artificial, de modo natural, la miel y la cera son buenos aislantes. [14] Por otro lado, las abejas suelen iniciar un aleteo con sus alas para reducir la temperatura dentro de la colmena. [14]

2.1.6. Humedad de la colmena

La humedad tiene un papel importante en la prevención de enfermedades dentro de la colmena, por esta razón es de importancia para las abejas controlar esta propiedad, el mecanismo que utilizan las abejas en estos casos es utilizar sus alas como ventiladores para expulsar la humedad de la colmena. [14]

2.1.7. Peso de la colmena

El peso es el principal factor utilizado por los apicultores para medir la cantidad en los almacenes de miel, de manera tradicional, los apicultores intentan levantar la colmena, en caso de no ser capaces, consideran que la miel esta lista para ser extraída [14], de manera precisa, se considera una extracción cuando el almacén de miel pesa cerca a los 40kg.[13]

2.1.8. Enjambrado

El evento de enjambre sucede cuando una colonia de abejas ha sobrepasado el límite físico de la colmena en la que habita, este proceso comienza con la reina engendrando nuevas reinas y drones, después de esto un enjambre de abejas y drones emigran a un nuevo posible lugar en el cual comienza una nueva colmena. [14]

Uno de los principales indicadores del enjambrado es el sonido que emiten las abejas, durante este proceso comienzan a emitir un sonido de vibración, este sonido es conocido por los apicultores y es la principal fuente de información que se obtiene sobre este proceso [13] [14].

2.1.9. Internet e IoT

Internet

En el contexto actual, internet se refiere a una red global con varios protocolos de conectividad que permite comunicar paquetes de datos de dispositivos, mediante un sistema de rúters, a la red. [15]

Rúter, router o enrutador

Se refiere a un dispositivo capaz de almacenar direcciones y enlaces mediante las cuales se encarga de mandar paquetes de datos.[15]

Internet de las cosas (IoT)

El termino de internet de las coas, o IOT por sus siglas en inglés (Internet of things), se refiere al concepto de entrelazar objetos físicos dentro de una red de internet, mediante componentes electrónicos y sistemas de software, con el objetivo de permitir la comunicación entre ellos y monitorear o controlar un sistema físico. [15]

Arquitectura IoT

Este concepto se refiere a la forma de estructurar u diseñar un sistema IOT y estos se dividen en capas y son 7 principales

1. Componentes físicos: sensores y controladores.
2. Dispositivos de conectividad.
3. Computación perimetral (análisis de datos y procesamiento).
4. Persistencia de datos.
5. Abstracción de datos (acceso y manipulación).
6. Aplicación (reportes, análisis y control).
7. Colaboración y procesos (usuarios y procesos comerciales).

Estas capas sirven para estructurar y definir la arquitectura del sistema IOT.[15]

Sensores

El sistema IOT interactúa con sensores, dispositivos físicos con el objetivo de adquirir datos mediante la capacidad de reaccionar a parámetros físicos como la humedad, temperatura, presión y luz y convertirla en energía eléctrica capaz de interactuar con el sistema. Durante esta interacción es posible configurar los dispositivos de manera que se ajusten a los requerimientos de la aplicación.[15]

Colmenas inteligentes

Los términos Colmenas IOT o colmenas inteligentes se refieren a la adición de un sistema IOT a una colmena apícola, esto con el objetivo de monitorear los parámetros de la colonia de abejas y hacer accesible la información de manera que pueda ser procesada para conocer el estado de la colmena. [16]

2.1.10. Inteligencia artificial

Sistema inteligente

Se refiere a un concepto abstracto en el cual se define a un sistema que actúa y razona de manera humana o de manera lógica [17]. Es uno de los posibles métodos para procesar datos de un sistema IOT [16].

2.1.11. Minería de datos

Preprocesamiento de datos

El preprocesamiento de datos es una etapa en la minería de datos que consiste en preparar y limpiar el conjunto de datos con el objetivo de mejorar su calidad para que sean adecuados para el análisis o modelado. Esto implica corregir valores inválidos, eliminar columnas irrelevantes, manejar valores faltantes, ajustar datos inconsistentes, entre otros [18].

Aprendizaje máquina

Extracción de características

La extracción de características es una técnica de preprocesamiento de datos utilizada en el aprendizaje máquina para transformar un conjunto de datos complejos y con muchas características, en un espacio más manejable y representativo. Se utiliza cuando hay demasiadas características ya sea para un análisis efectivo o para la visualización de datos [19].

2.2. Trabajos relacionados

2.2.1. Introducción

La adición de tecnologías de internet de las cosas (IoT) en la apicultura ha significado un cambio revolucionario a comparación de las prácticas tradicionales, aumentando la eficiencia, productividad y escalabilidad. Estas tecnologías involucran el uso de diferentes sistemas interconectados, incluyendo sensores, microcontroladores y software, con el objetivo de ayudar a monitorear y administrar las actividades apícolas en tiempo real. En este capítulo se exploran las aplicaciones relevantes en las cuales se han desarrollado las aplicaciones de IoT en el monitoreo de colmenas apícolas, con el objetivo de dar seguimiento a la salud y actividad de las colonias de abejas, proveyendo así información de la colmena, incluyendo parámetros como temperatura, humedad, peso y acústica que ayudan a los apicultores a mantener colonias saludables y tomar decisiones acordes a la información en tiempo real. La arquitectura de sistemas IoT para monitoreo de colmenas involucra varios componentes clave, incluyendo nodos de sensores, sistemas de transmisión de datos, sistemas de energía y el componente de procesamiento de datos. En este capítulo se examinan las prácticas utilizadas para implementar estos sistemas.

2.2.2. Nodos de sensores

Este capítulo se enfoca en examinar las implementaciones de nodos de sensores. Los nodos de sensores son componentes críticos en el monitoreo de colmenas, ya que estos son los encargados de coleccionar datos en variables ambientales y específicas de la colmena, haciendo posible el análisis de datos y permitiendo la toma de decisiones.

Embedded Software for IoT Bee Hive Monitoring Node

En este artículo se presenta un sistema embebido para monitoreo de variables relevantes, se propone un sistema que tiene las capacidades de monitorear humedad, temperatura, peso y audio, sin embargo, no se implementó el monitoreo de peso y audio. Para este sistema se utilizó el sensor SHT21 [20] para la medición de temperatura y humedad. [21]

A Smart Sensor-Based Measurement System for Advanced Bee Hive Monitoring

En el sistema propuesto en este artículo se desarrolla un sistema de monitoreo de parámetros relevantes para la colmena, incluyendo peso, sonido, temperatura, humedad y CO₂. El objetivo es desarrollar un sistema que dé una visión general del ambiente interno y externo de la colmena. [22] Este sistema es modular y se compone de dos módulos principales:

- **Módulo Abeja:** Este módulo se instala en cada colmena y está constituido por un módulo Raspberry Pi 3B [23], una tarjeta de sonido UCA22 [24], dos micrófonos ADMP401 MEMS [25], dos sensores de humedad y temperatura DHT22 [26], células de carga TAL220 [27] con el módulo interfaz HX711 [28] y un sensor de CO₂ TL6615 [29].
- **Módulo Reina:** Este módulo se instala cerca del grupo de sensores abeja y se encarga de coleccionar la información de los mismos. También está constituido por una Raspberry Pi 3B, sensores DHT22 y un puente 5G (no especificado) utilizado para comunicarse con el servidor remoto. [22]

El sistema de micrófonos recopila muestras de 30 segundos cada 10 minutos, a una tasa de 32 kHz.

High Reliability Wireless Sensor Node for Bee Hive Monitoring

En este artículo se propone un sistema diseñado para condiciones ambientales de entre -20 a 60 grados centígrados y con una arquitectura principalmente modular, permitiendo intercambiar sensores según se requiera, esto mediante la interfaz digital I2C. [30] Se denota la importancia de utilizar sensores de temperatura y humedad, principalmente durante el invierno para prevenir la formación de rocío dentro de la colmena. El sensor de temperatura utilizado fue un SHT21 de Sensirion, este sensor tiene un consumo de 1mW en modo medición y 1 μ W en modo inactivo. [30] Se utiliza el sistema de medición de peso HX711 de Avia Semiconductor que consta de un sistema de alimentación, un amplificador y un convertidor

analógico digital de 24-bit, en conjunto con 4 células de carga. Todo este sistema tiene un consumo de 8.25mW en modo activo y 5.5 μ W en modo inactivo. [30] Adicionalmente, el sistema cuenta con un sensor de inclinación DMA08 para monitorear si la colmena está nivelada, si ha sido robada y detectar caídas. [30] El sistema también cuenta con un micrófono MP34DT05-A, la justificación para este elemento es que es útil para detectar eventos de enjambre y escasez de comida en el invierno. [30]

Bee Swarm Activity Acoustic Classification for an IoT-Based Farm Service

En esta investigación se procesa información recopilada de un sistema que utiliza un micrófono TDK InvenSense ICS-40300 y una placa Atmel ATmega32U4 sobre la colmena para posteriormente ser procesada en un servidor remoto. [31]

Maintenance-free IoT Gateway Design for Bee Hive Monitoring

El módulo descrito en este artículo tiene las capacidades de recopilar información importante sobre el estado de la colmena mediante: un sensor SHT21 para medir humedad y temperatura, un sensor de presión atmosférica MPL3115A2 [32], un sensor de intensidad lumínica TSL2561 [33], células de carga HX711 colocadas con el objetivo de monitorear el peso de la colmena, un sensor de radiación UV VEML6075 [34] y finalmente, un sensor de concentración de polvo GP2Y1010AU0F [35]. [35]

A Pi-Based IoT System Design

En este sistema se integra la suite de sensores de GrovePi [7], en concreto los sensores de humedad, temperatura, GPS, sonido e imágenes térmicas. [7]

2.2.3. Sistema de transmisión de datos

Este capítulo se centra en los sistemas de transmisión de datos utilizados en estos sistemas, presentando diversas soluciones de hardware y software que permiten la transmisión eficiente de datos desde las colmenas hasta las plataformas de análisis y monitoreo remoto.

Embedded Software for IoT Bee Hive Monitoring Node

El sistema está construido alrededor del componente ESP8266 que integra un microcontrolador Tensilica L106 32-bit en conjunto con el módulo transmisor Wi-Fi que integra circuitos de radio frecuencia y es capaz de transmitir datos mediante interfaces digitales como SPI, I2C, y UART. Además, el módulo ESP8266 cuenta con tres modos de operación: activo, dormido y dormido profundo, los cuales son aprovechados por el sistema para optimizar el uso de energía. [21]

High Reliability Wireless Sensor Node for Bee Hive Monitoring

En este sistema también se utiliza un módulo ESP8266 serie 32-bit a 80MHz, el objetivo de utilizar este componente es simplificar el diseño utilizando la capacidad del componente para una conexión Wi-Fi directa. [30]

Maintenance-free IoT Gateway Design for Bee Hive Monitoring

El módulo ESP8266 es de nuevo utilizado en este sistema, en concreto la versión ESP8266-12 (no en bib) producido por A.I.Thinker para dar conectividad al módulo que contiene el nodo de sensores. Adicionalmente en este proyecto se agrega un módem A6 GSM/GPRS (no en bib) que sirve como compuerta para conectar los módulos a la red 5G. [35]

A Pi-Based IoT System Design

Este sistema también implementa el método de múltiples módulos con conexión Wi-Fi conectados a un módem independiente que se conecta a la red móvil para proveer de internet a los módulos. [7]

2.2.4. Manejo de energía

Este capítulo examina las diversas estrategias de manejo de energía implementadas en sistemas de monitoreo avanzado de colmenas. Desde la conexión a la red eléctrica hasta soluciones autónomas con energía solar y supercapacitores.

A Smart Sensor-Based Measurement System for Advanced Bee Hive Monitoring

En este artículo se energiza mediante una conexión a la red eléctrica, los módulos Reina y Abeja consumen 4 y 4.2 watts respectivamente. [22]

High Reliability Wireless Sensor Node for Bee Hive Monitoring

Para este sistema se tomó la decisión de utilizar supercapacitores XV Supercapacitor de Eaton [36], principalmente por su vida útil de 20 años y su alto desempeño en altas temperaturas, en conjunto con paneles solares (no especificados) y un convertidor step up para transformar el voltaje de salida del panel de 2.7V a 3.3V. [30]

Maintenance-free IoT Gateway Design for Bee Hive Monitoring

En esta investigación, la energía se obtiene utilizando paneles solares (no especificado) en conjunto con un módulo LT3652 [37] que regula la cantidad de voltaje de salida del panel solar para maximizar la transferencia de energía. Además, se utiliza un cargador LTC3652 [38]

para ajustar el voltaje de carga de los supercapacitores al voltaje especificado por el módulo LT3652. [35]

A Pi-Based IoT System Design

En este sistema se cuenta con una batería para dispositivos celulares con una capacidad de 10000 mAh (180000 Joules a 5V) que mantiene el sistema encendido entre 27 y 33 horas. [7]

2.2.5. Procesamiento de datos

El capítulo se enfoca en el procesamiento de datos acústicos para la detección de eventos de enjambre en un servicio agrícola basado en IoT.

Bee Swarm Activity Acoustic Classification for an IoT-Based Farm Service

Como ya se mencionó, el enfoque de esta investigación es el procesamiento de datos acústicos con el objetivo de detectar eventos de enjambre, el recurso principal para esto es el desarrollo del modelo es el proyecto de fuente abierta de colmenas Open Source Beehives Project (OSBP) [16]. [31] Los datos de entrenamiento fueron recopilados del OSBP, los cuales consistieron de aproximadamente 122 minutos de audio a los cuales se les disminuyó la frecuencia a 16kHz, la resolución a 16 bits y fueron divididos en muestras de 3 segundos, resultando en 1800 muestras destinadas para entrenamiento y 643 para pruebas. Se tomó la precaución de utilizar muestras de una sola colmena. [31] El diseño experimental se desarrolló utilizando referencias de reconocimiento del habla [39]; de este modo, se desarrollaron dos procesos, los cuales consistieron en aplicar una extracción de características al audio para generar un vector de características que posteriormente sería clasificado. [31] Para la extracción de características se utilizaron dos métodos:

- **Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC):** Este es el principal método para la extracción de características, el resultado de este proceso fue un vector con 12 coeficientes Mel-Frequency Cepstral a los cuales se les sumó un coeficiente de energía. Posteriormente se calcularon y añadieron las derivadas de primer y segundo orden para los primeros 13 elementos, lo que resultó en 39 coeficientes. [31]
- **Linear Predictive Coding (LPC):** Este método fue secundario y utilizado como comparación, durante este proceso también se aplicó una sustracción espectral para reducir el ruido de fondo. Este método requiere una señal en el dominio de la frecuencia, por lo que se utilizó una transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) para transformar la frecuencia. [31]

En cuanto a la clasificación de muestras se utilizaron dos métodos paralelos:

- **Hidden Markov Model (HMM):** Este método se desarrolló con dos topologías, una con 15 estados, similar a los modelos de reconocimiento del habla, y otra con un estado, similar a los modelos de GMM. [31]

- **Gaussian Mixture Model (GMM):** Para este modelo se inició con la inicialización plana de parámetros y se continuó con la reestimación de Baum-Welch, repitiendo el proceso hasta alcanzar 32 mezclas de PDFs Gaussianas por estado. [31]

2.2.6. Conclusión

A lo largo de este capítulo, se han explorado diversas arquitecturas y tecnologías utilizadas en estos sistemas, destacando los componentes esenciales como los nodos de sensores y los sistemas de transmisión de datos, así como las soluciones innovadoras para el manejo de energía y el procesamiento de datos.

- **Nodos de Sensores:** Los sistemas presentados varían en cuanto a la complejidad y especificidad de los sensores utilizados, pero todos apuntan a proporcionar una visión detallada del ambiente interno y externo de la colmena. Los sensores más comunes incluyen:
 - Temperatura y Humedad: Sensores como el SHT21 y DHT22.
 - Peso: Células de carga junto con el módulo HX711.
 - Acústica: Micrófonos MEMS, como el ADMP401 y MP34DT05-A.
- **Sistemas de Transmisión de Datos:** La mayoría de los sistemas utilizan el módulo ESP8266 para la transmisión de datos vía Wi-Fi, destacando su eficiencia energética y capacidad de operación en modos de bajo consumo. Algunos sistemas también incorporan módulos GSM/GPRS para asegurar la conectividad con la red móvil en áreas remotas.
- **Manejo de Energía:** Las soluciones energéticas tienen una amplia variación, sin embargo, la opción más común es el uso de paneles solares en conjunto con baterías de alta capacidad. Adicionalmente se destaca el uso de supercapacitores como una opción para almacenar energía.
- **Procesamiento de Datos:** La utilización de modelos como HMM y GMM para clasificar eventos en las colmenas demuestra el potencial del procesamiento avanzado de datos en la mejora de la gestión apícola.

Los trabajos relacionados en sistemas de monitoreo de colmenas basados en IoT muestran un progreso notable en términos de integración de tecnologías y mejora de la eficiencia. Sin embargo, hay margen para la innovación, especialmente en áreas como la conectividad, la optimización energética y el desarrollo de algoritmos más avanzados para el análisis de datos. La colaboración entre investigadores, ingenieros y apicultores es crucial para impulsar esta área de oportunidad y asegurar un futuro sostenible para la apicultura.

2.3. Métodos y herramientas

2.3.1. Sensor DHT22

El sensor DHT22 mide temperatura y humedad. Se conecta de la siguiente manera:

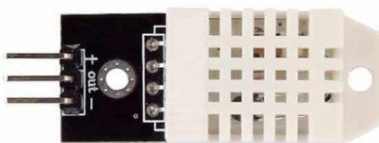


Figura 2.2: Sensor DHT22.

- VCC a 3.3–6 V.
- OUT a un pin digital con protocolo 1-wire.
- GND a tierra.

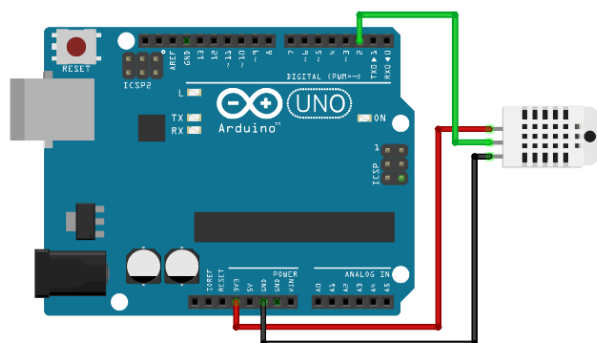


Figura 2.3: Conexión del sensor DHT22 a Arduino.

Herramientas de software

- Arduino IDE 2.2.1 en Windows 10.
- Librerías de Adafruit: DHT sensor library y Adafruit Unified Sensor.

2.3.2. Celda de carga y módulo HX711

Las celdas de carga son los sensores que recolectan información sobre el peso de una carga aplicada sobre los mismos. Los sensores a utilizar son equivalentes a los de la ilustración 3, cuentan con 4 cables y 4 orificios roscados para fijar la celda, así como una imagen indicativa de la dirección de la carga.

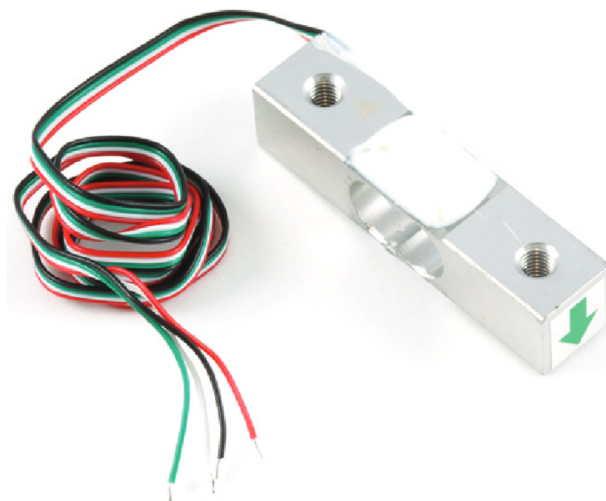


Figura 2.4: Celda de carga.

El módulo HX711 es una placa electrónica que funciona como interfaz entre una placa Arduino y una celda de carga. Este se muestra en la ilustración 2.5. El módulo HX711 es un convertidor analógico a digital (ADC) de 24 bits, diseñado específicamente para aplicaciones de pesaje y medición de fuerza. Permite leer las señales analógicas de la celda de carga y convertirlas en valores digitales que pueden ser procesados por un microcontrolador como Arduino.

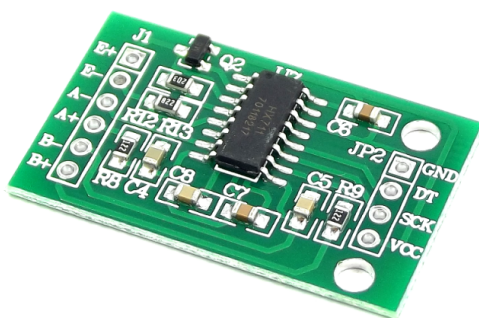


Figura 2.5: Módulo HX711.

Las conexiones se realizan de acuerdo a las tablas ?? y ?. La celda de carga se conecta al módulo HX711, y este último se conecta a la placa Arduino. El módulo HX711 requiere una alimentación de 5 V y tiene dos pines de salida: uno para la señal de datos (DT) y otro para el reloj (SCK).

COLOR DEL CABLE	CONECCIÓN EN MÓDULO
ROJO	E+
NEGRO	E-
BLANCO	A-
VERDE	A+

Tabla 2.1: conexiones celda-HX711

PIN HX711	CONECCIÓN EN ARDUINO
GND	GND
DT	A1
SCK	A0
VCC	5 V

Tabla 2.2: conexiones HX711-Arduino

Ejemplo de código HX711

```

1 #include "HX711.h"
2 const int DOUT = A1;
3 const int CLK = A0;
4 HX711 balanza;
5
6 void setup() {
7   Serial.begin(9600);
8   balanza.begin(DOUT, CLK);
9   balanza.set_scale(439430.25);
10  balanza.tare();
11 }
12
13 void loop() {
14   Serial.println(balanza.get_units());
15   delay(1000);
16 }
```

Código 2.1: Ejemplo de código HX711

2.3.3. Controlador ESP32

El ESP32 integra Wi-Fi y Bluetooth en un solo chip con bajo consumo en modo Deep Sleep (10 μ A a 3.3 V).

- Procesador: Xtensa LX6, 32 bits, hasta 240 MHz.
- RAM: 520 KB SRAM.

Para utilizar el controlador con el Arduino IDE2.0 es necesario agregar el siguiente paquete a Additional Boards Manager como se muestra en la figura 2.6 y el código 2.2.

```
1 https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/  
   package_esp32_index.json
```

Código 2.2: URL para Boards Manager de ESP32

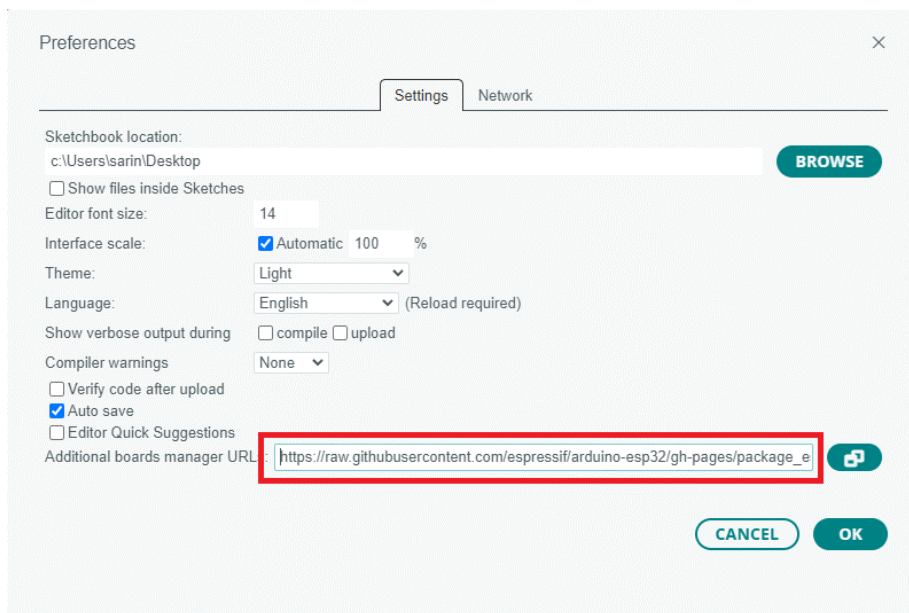


Figura 2.6: Selección de placas ESP32 en Arduino IDE.

El siguiente paso es instalar los controladores para la placa ESP32, se muestra en la figura 2.7.

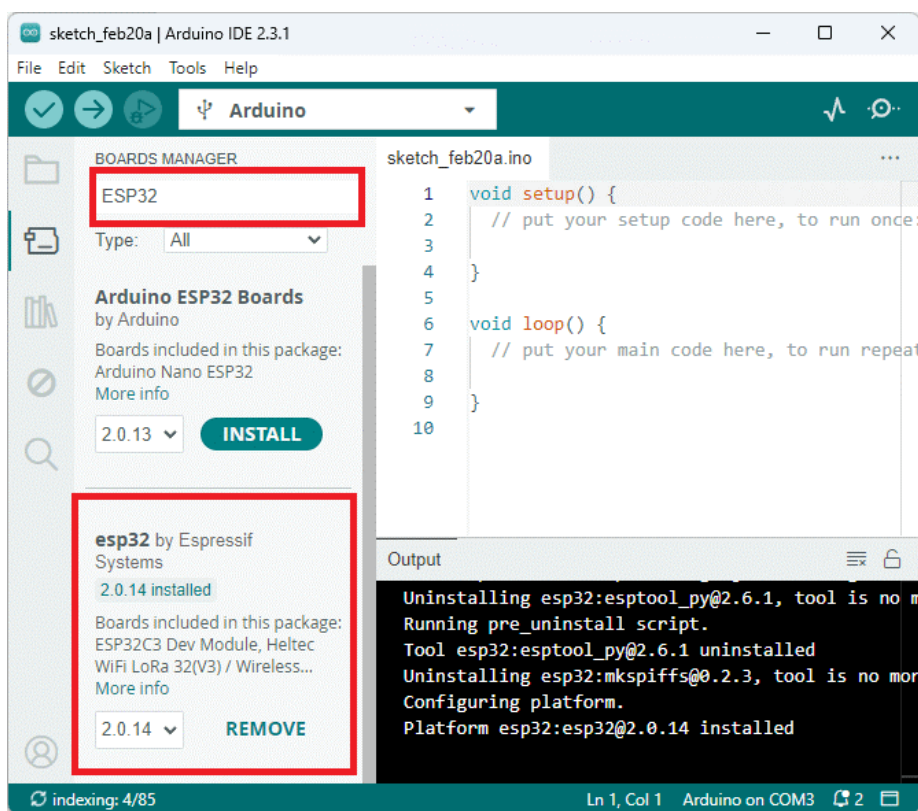


Figura 2.7: Instalación del soporte para ESP32 en Arduino IDE.

Código de prueba:

```

1 #include <Arduino.h>
2 #define LED 2
3 void setup() {
4   Serial.begin(115200);
5   pinMode(LED, OUTPUT);
6 }
7 void loop() {
8   digitalWrite(LED, HIGH);
9   delay(1000);
10  digitalWrite(LED, LOW);
11  delay(1000);
12 }

```

Código 2.3: Ejemplo de código de parpadeo de LED en ESP32

2.3.4. Micrófono INMP441

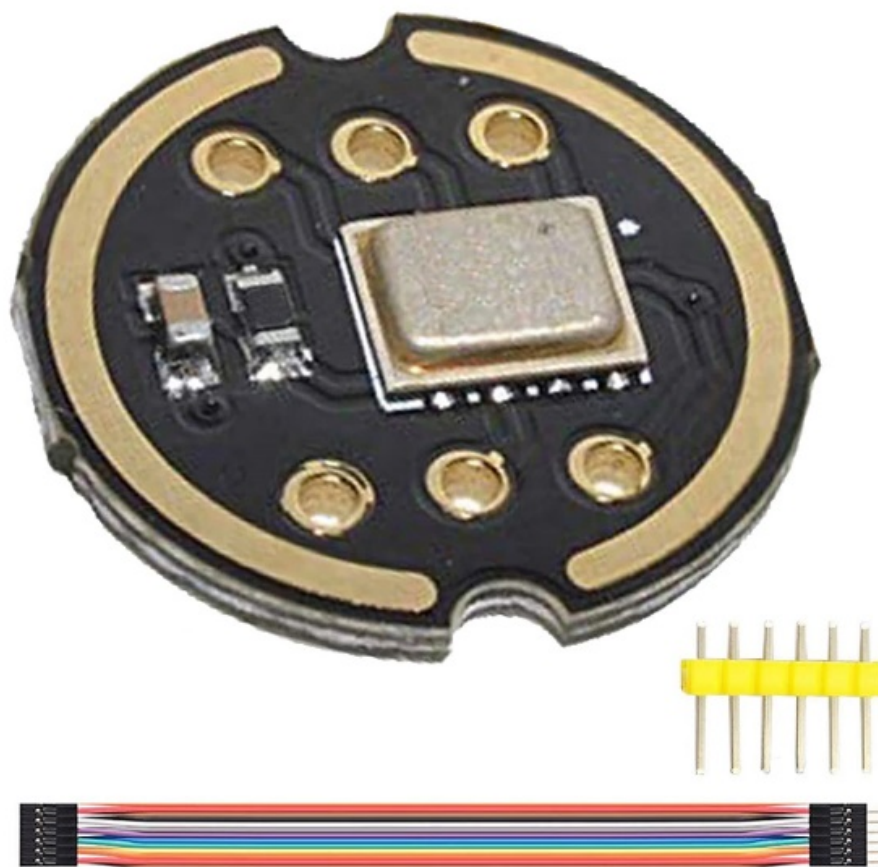


Figura 2.8: Módulo de micrófono INMP441.

El sensor INMP441 es un micrófono multidireccional que utiliza el protocolo I2S [40] para transferencia de audio, de la misma manera que, y como se mencionó en los trabajos relacio-

nados, el dispositivo INMP401 es utilizado con el controlador ESP8266, el dispositivo INMP441 es comúnmente utilizado con el dispositivo ESP32, principalmente por su compatibilidad mediante el protocolo I2S. El módulo INMP441 se muestra en la figura 7 [41].

Capítulo 3

Análisis de requerimientos y diseño del sistema

3.1. Arquitectura del sistema

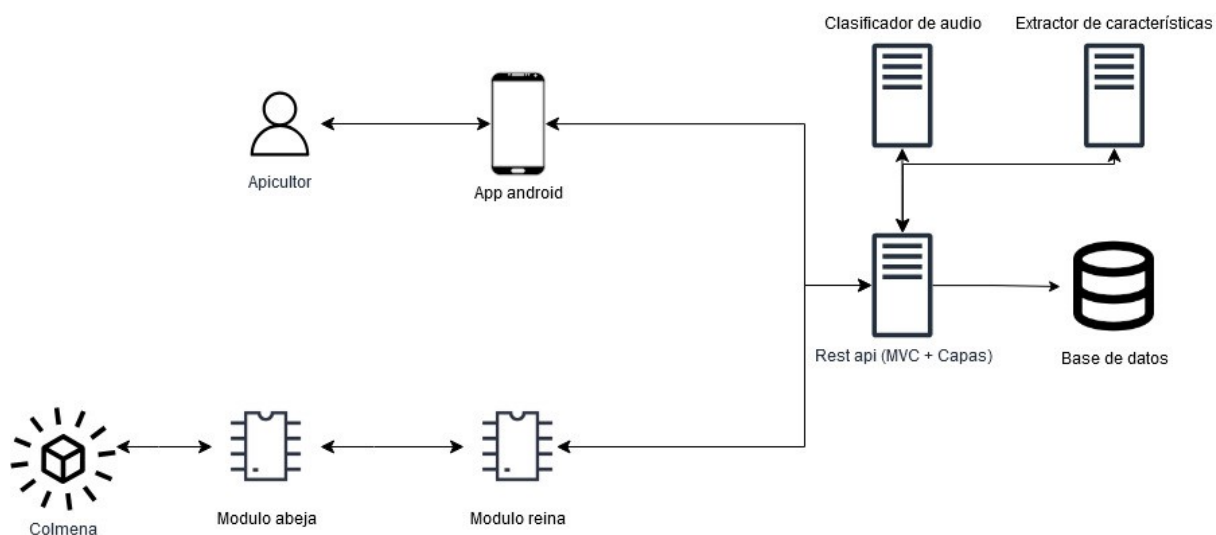


Figura 3.1: Arquitectura del sistema

3.2. Diseño de la base de datos

3.3. Microcontrolador del sistema

3.4. Diseño electrónico

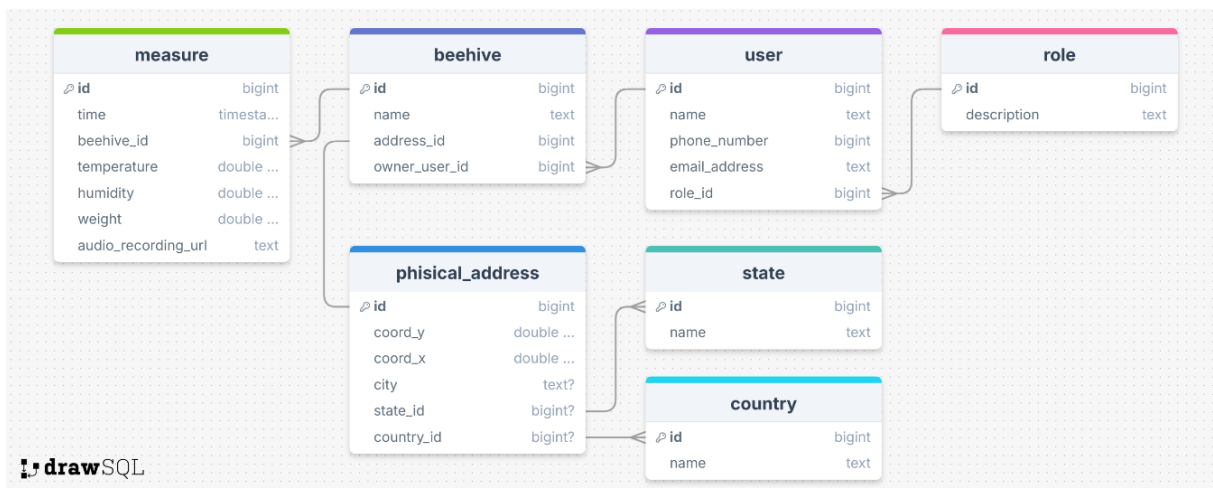


Figura 3.2: Diseño de la base de datos

3.5. Diagrama electrónico del sistema

En la Figura 3.4 se muestra el diagrama electrónico del sistema propuesto, donde se pueden observar los principales componentes y sus conexiones.

3.6. Inteligencia artificial

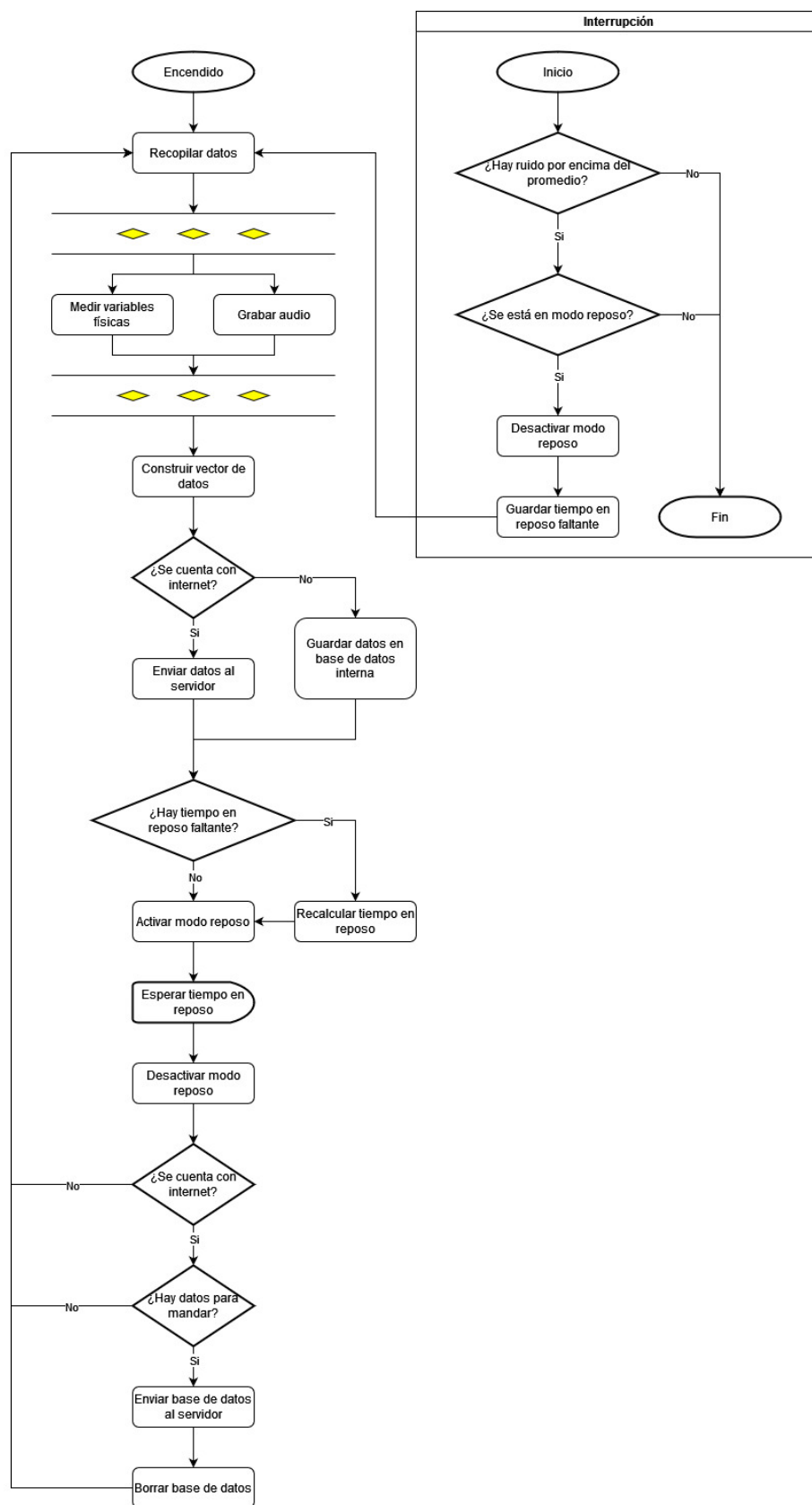


Figura 3.3: Algoritmo del controlador.

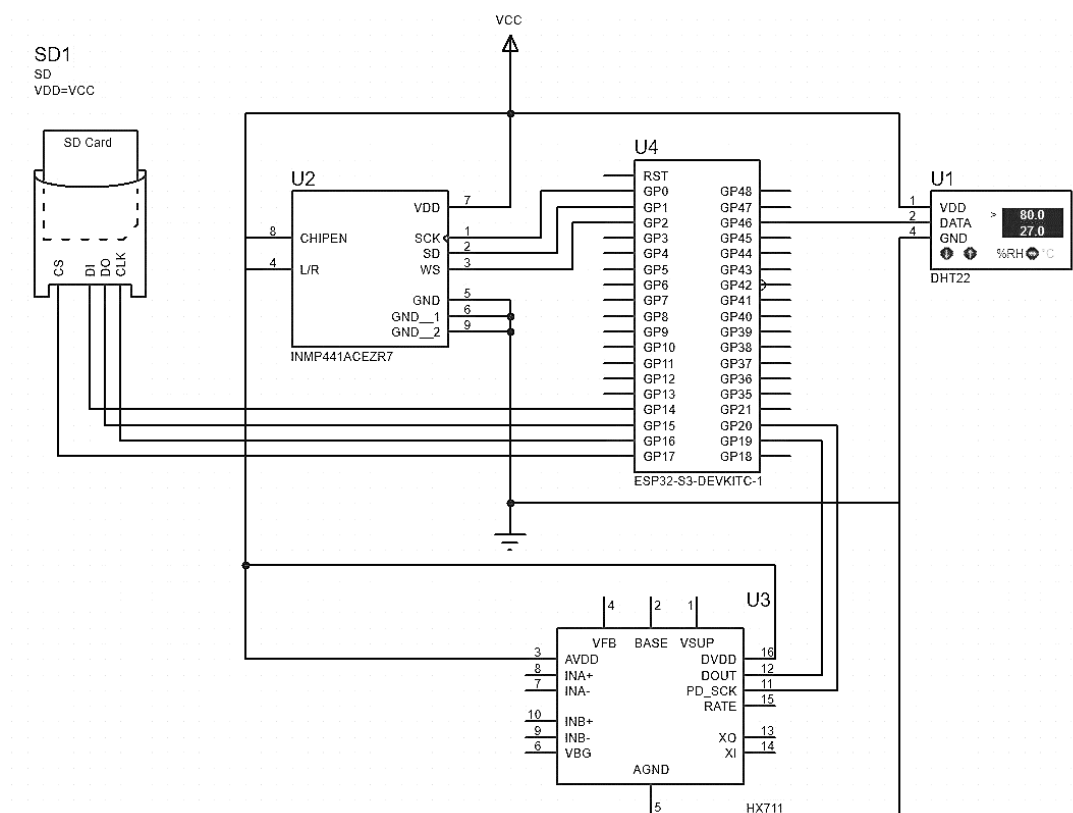


Figura 3.4: Diagrama electrónico del sistema.

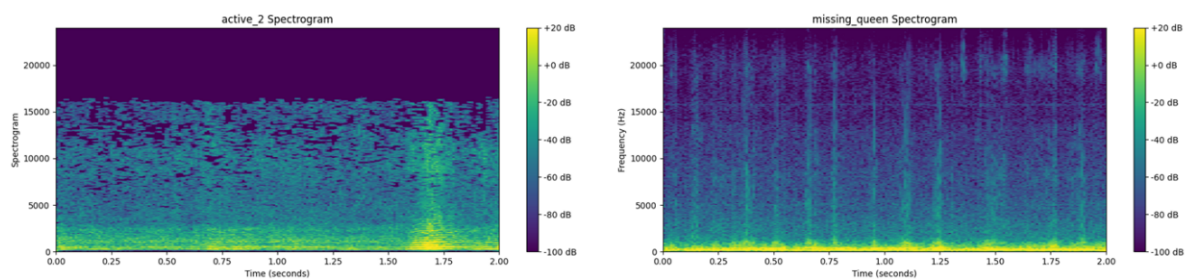


Figura 3.5: Comparación de audio.

REFERENCIAS

- [1] D. Mexico, *Trabajadores en la Apicultura: Salarios, diversidad, industrias e informalidad laboral*, 2023. visitado 3 de dic. de 2023. dirección: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/occupation/trabajadores-en-la-apicultura?typeJob1=formalOption>.
- [2] N. Bradbear, «La apicultura y los medios de vida sostenible,» *Folleto de la FAO sobre diversificación*, vol. 1, pág. 17, 2005.
- [3] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, *Producción de miel en México*, 2018. dirección: <https://www.gob.mx/agricultura>.
- [4] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, *Actualización de colmenas registradas*, 2022. dirección: <https://www.gob.mx/agricultura>.
- [5] C. G. de Ganadería, «Situación actual y perspectiva de la apicultura en México,» *Claridades Agropecuarias*, 2015. visitado 7 de dic. de 2023. dirección: <https://atlas-abejas.agricultura.gob.mx/pdfs/ca199-3.pdf>.
- [6] D. Mexico, *Cría y Explotación de Animales*, 2023. visitado 2 de dic. de 2023. dirección: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/animal-production-and-aquaculture?yearSelectorGdp=timeOption0>.
- [7] Y.-L. Chen, H.-Y. Chien, T.-H. Hsu, Y.-J. Jing, C.-Y. Lin e Y.-C. Lin, «A Pi-Based Beehive IoT System Design,» en 2020, págs. 535-543. DOI: 10.1007/978-3-030-16946-6_43.
- [8] M. Lara Meza, «Sistema informático en la nube para gestión de datos de condiciones de temperatura en apicultura,» Tesis doct., TECNM, 2023.
- [9] *SolutionBee Commercial Beehive Monitoring System*, Accessed: 2024-06-16. dirección: <https://www.solutionbee.com/>.
- [10] *OpenEnergyMonitor: Open Source Energy Monitoring*, Accessed: 2024-06-16. dirección: <https://openenergymonitor.org/>.
- [11] V. Kulyukin, S. Mukherjee y P. Amlathe, «Toward Audio Beehive Monitoring: Deep Learning vs. Standard Machine Learning in Classifying Beehive Audio Samples,» *Applied Sciences*, vol. 8, n.º 9, pág. 1573, sep. de 2018, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app8091573.

- [12] A. Correa Benítez, I. Vásquez Valencia, N. Peña Haaz, L. León Luna y R. Anguiano Báez, «Buenas prácticas pecuarias en la producción primaria de miel,» Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UNAM, inf. téc., 2018. visitado 2 de dic. de 2023. dirección: https://atlas-abejas.agricultura.gob.mx/pdfs/Manual_BPP_en_la_Produccion_primaria_de_Miel_octubre_2018.pdf.
- [13] D. Cramp, *A Practical Manual of Beekeeping*, n.d. visitado 5 de jun. de 2024. dirección: <http://www.howtobooks.co.uk>.
- [14] F. Chadwick, S. Alton, E. S. Tennant, B. Fitzmaurice y J. Earl, *The bee book*. 2016, pág. 221, ISBN: 9781465443830.
- [15] R. Kamal, *Internet of Things: Architecture and Design*. McGraw Hill Education, 2017.
- [16] IAAC, *The Open Source Beehives Project*, 2024. dirección: <https://beehives.iaac.net>.
- [17] S. J. Russell y P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4th. Pearson, 2022.
- [18] Statistical Modeling Team, *Statistical Modeling in Machine Learning*, Online resource, 2023.
- [19] A. Richer y B. Coelho, «Feature Extraction Techniques for Data Analysis,» *Journal of Data Science*, vol. 11, n.º 2, págs. 123-145, 2013.
- [20] Sensirion, *SHT21 Digital humidity and temperature sensor*, 2017. dirección: <https://www.sensirion.com>.
- [21] M. Vidrascu y D. Svasta, *Embedded Software for IoT Bee Hive Monitoring Node*, Conference paper, 2017.
- [22] S. Cecchi, S. Spinsante, A. Terenzi y S. Orcioni, «A Smart Sensor-Based Measurement System for Advanced Bee Hive Monitoring,» *Sensors*, vol. 20, n.º 9, pág. 2726, mayo de 2020, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20092726.
- [23] R. P. Foundation, *Buy a Raspberry Pi 3 Model B*, 2016. dirección: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>.
- [24] Behringer, *Behringer UCA222 USB Audio Interface*, 2018. dirección: <https://www.music-group.com>.
- [25] A. Devices, *ADMP401 MEMS Microphone Datasheet*, 2016. dirección: <https://www.analog.com>.
- [26] T. Liu, *Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302) Capacitive-type humidity and temperature module/sensor*, n.d.
- [27] S. Electronics, *Load Cell - 10kg TAL220*, 2015. dirección: <https://www.sparkfun.com/products/13329>.
- [28] S. Electronics, *HX711 24-Bit ADC for Weight Scales*, 2016. dirección: <https://www.sparkfun.com/products/13879>.
- [29] Telaire, *T6615 Dual Channel CO2 Sensor Module*, 2017. dirección: <https://www.amphenol-sensors.com>.

- [30] M. Vidrascu, D. Svasta y R. Vladescu, «High Reliability Wireless Sensor Node for Bee Hive Monitoring,» *Sensors and Actuators*, págs. 102-110, 2016.
- [31] A. Zgank, *Bee Swarm Activity Acoustic Classification for an IoT-Based Farm Service*, Conference proceedings, 2019.
- [32] N. Semiconductors, *MPL3115A2 Barometric Pressure Sensor*, 2017. dirección: <https://www.nxp.com>.
- [33] A. L. System, *TSL2561 Luminosity Sensor*, 2018. dirección: <https://learn.adafruit.com/tsl2561>.
- [34] A. Industries, *VEML6075 UVA UVB and UV Index Sensor Breakout*, 2019. dirección: <https://www.adafruit.com/product/3964>.
- [35] M. Vidrascu y D. Svasta, *Maintenance-free IoT Gateway Design for Bee Hive Monitoring*, Technical report, 2017.
- [36] E. Corporation, *XV Supercapacitor Large Cell*, 2016. dirección: <https://www.eaton.com>.
- [37] A. Devices, *LT3652 Solar Battery Charger Datasheet*, 2018. dirección: <https://www.analog.com>.
- [38] A. Devices, *LTC3652 Ultralow Quiescent Battery Charger Datasheet*, 2018. dirección: <https://www.analog.com>.
- [39] M. Gales y S. Young, «The Application of Hidden Markov Models in Speech Recognition,» *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 1, n.º 3, págs. 195-304, 2008, ISSN: 1932-8346. DOI: 10.1561/20000000004. dirección: <http://dx.doi.org/10.1561/20000000004>.
- [40] K. Technologies, *The I2S Protocol and Why Digital Audio is Everywhere*, Accessed: 2024-06-16, 2021. dirección: https://blogs.keysight.com/blogs/tech/bench.entry.html/2021/01/19/the_i2s_protocolandw.html.
- [41] InvenSense, *INMP441 Omnidirectional Microphone with Bottom Port and I2S Digital Output: General Description*, Accessed: 2024-06-16, 2017. dirección: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/INMP441.pdf>.