

**Mecatrónica en la agroindustria: Integración de tecnologías en el cultivo de palma de
aceite colombiano**

Joan Sebastian Duarte Murcia

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico

Director

Omar Leonardo Peña Galvis

Magister en ingeniería

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Mecatrónica

2026

Contenido

Introducción	9
1. Mecatrónica en la agroindustria: Integración de tecnologías en el cultivo de la palma de aceite colombiano.....	10
1.1. Planteamiento del problema	10
1.2. Justificación.....	10
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general.....	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
2. Marco referencial	12
2.1. Marco teórico	12
2.1.1. Automatización agrícola y su relevancia en la palma de aceite	12
2.1.2. Arquitectura de sistemas IoT en entornos agrícolas	14
2.1.3. Tecnologías para medición y control.....	15
2.2. Marco conceptual	15
3. Método	16
3.1. Ampliar conocimientos en el área mecatrónica y agrícola	17
3.2. Diseñar y validar un dispositivo de medición de nivel	17
3.3. Validar el consumo energético de aspersores eléctricos en polinización.....	18
3.4. Automatizar el sistema de rondas preventivas contra la pudrición del cogollo (PC)	19
4. Resultados	19
4.1. Ampliar conocimientos en el área mecatrónica y agrícola	19
4.1.1. Revisión bibliográfica	19

4.1.2. Resultados de la capacitación técnica.....	21
4.2. Diseñar y validar un dispositivo de medición de nivel	23
4.2.1. Definición de variables de interés	24
4.2.2. Análisis de sensores disponibles en el mercado	24
4.2.3. Diseño electrónico	25
4.2.4. Diseño mecánico	28
4.2.5. Desarrollo del sistema de control	31
4.2.6. Integración de subsistemas	32
4.2.7. Validación del prototipo	33
4.3 Análisis de el consumo energético de aspersores eléctricos en labores de polinización. ...	36
4.3.1. La Pila (Royal Condor)	36
4.3.2. Zeppelin ESPULV12LEL	37
4.3.3. Evolution 10LT (Matabi)	38
4.3.4. Evolution 15 LTC (Matabi).....	39
4.3.5. FT-20B (Fengtian).....	40
4.3.6. Análisis comparativo de consumos	41
4.4. Sistema semiautomatizado de rondas preventivas contra la pudrición del cogollo (PC)...	41
5. Conclusiones	44
Referencias.....	47

Lista de figuras

Figura 1. <i>Planos de ejercicios realizados durante los talleres.</i>	22
Figura 2. <i>Certificado CSWA.</i>	22
Figura 3. <i>Esquema de tanque cenirrómetro desarrollado por Cenicaña.</i>	23
Figura 4. <i>Sensor HY-SRF05.</i>	24
Figura 5. <i>DHT22.</i>	25
Figura 6. <i>ESP32.</i>	26
Figura 7. <i>Esquema de conexiones realizado en Proteus.</i>	27
Figura 8. <i>Esquema PCB / PCB fabricada.</i>	27
Figura 9. <i>Conexiones en PCB</i>	28
Figura 10. <i>CENIMED V1.0.</i>	29
Figura 11. <i>CENIMED V3.0.</i>	30
Figura 12. <i>Especificaciones de impresión 3D para las piezas del CENIMED.</i>	30
Figura 13. <i>CENIMED, prototipo funcional.</i>	31
Figura 14. <i>Aplicación CENIMED desarrollada en APP Inventor.</i>	32
Figura 15. <i>Pruebas de CENIMED en campo.</i>	33
Figura 16. <i>Pruebas de CENIMED en campo.</i>	34
Figura 17. <i>Grafica de correlación entre humedad y temperatura.</i>	35
Figura 18. <i>La Pila (Royal Condor).</i>	36
Figura 19. <i>Zeppelin ESPULV12LEL.</i>	37
Figura 20. <i>Evolution 10LT (Matabi).</i>	38
Figura 21. <i>Evolution 15 LTC (Matabi)</i>	39
Figura 22. <i>FT-20B (Fengtian)</i>	40

Figura 23. <i>Propuesta de plataforma. Fuente: CENIPALMA</i>	42
Figura 24. <i>Plano eléctrico del sistema semiautomatizado.</i>	44

Lista de apéndices

Apéndice A. Código Arduino del cenirrometro [CENIMED.ino].

Apéndice B. CENIMED - DOCUMENTO TECNICO 2025

Apéndice C. CENIMED - MANUAL DE CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE 2025

Nota: los apéndices son archivos externos al documento.

Resumen

El cultivo de palma de aceite en Colombia enfrenta importantes desafíos asociados a la escasez de mano de obra, el aumento de los costos operativos y la necesidad de mejorar la productividad y sostenibilidad del sector. En este contexto, la mecanización y la automatización agrícola se presentan como alternativas estratégicas para optimizar los procesos productivos y fortalecer la competitividad de la agroindustria palmicultura. El presente trabajo de grado tiene como objetivo apoyar el desarrollo, la optimización y la adaptación de tecnologías mecatrónicas aplicadas al cultivo de palma de aceite, mediante una metodología mixta que combina revisión bibliográfica, diseño experimental y validación en campo. Para ello, se desarrollaron cuatro líneas principales de trabajo: la ampliación de conocimientos en el área mecatrónica y agrícola, el diseño y validación de un dispositivo automatizado de medición de nivel, el análisis del consumo energético de aspersores eléctricos utilizados en labores de polinización y la propuesta de un sistema semiautomatizado para las rondas preventivas contra la pudrición del cogollo (PC). Como resultado, se diseñó y validó un prototipo funcional de medición de nivel para tanque cenirrómetro, capaz de registrar de forma automática el nivel de agua, la temperatura y la humedad relativa, con una correlación superior al 95% frente al método manual y una autonomía aproximada de 50 horas. Asimismo, se realizó un análisis comparativo del consumo energético de diferentes aspersores eléctricos, identificando equipos más eficientes en términos de energía por litro aplicado. Finalmente, se planteó un sistema semiautomatizado que mejora la comunicación y coordinación durante las rondas preventivas contra la PC, contribuyendo a una aplicación más segura y eficiente de los productos fitosanitarios.

Palabras clave: mecatrónica, automatización agrícola, IoT, palma de aceite

Abstract

The oil palm crop in Colombia faces significant challenges related to labor shortages, increasing operational costs, and the need to improve productivity and sustainability within the sector. In this context, agricultural mechanization and automation emerge as strategic alternatives to optimize production processes and strengthen the competitiveness of the oil palm agroindustry. This undergraduate thesis aims to support the development, optimization, and adaptation of mechatronic technologies applied to oil palm cultivation through a mixed methodology that combines bibliographic review, experimental design, and field validation. Four main areas of work were addressed: the strengthening of knowledge in the mechatronic and agricultural fields, the design and validation of an automated level measurement device, the analysis of energy consumption of electric sprayers used in assisted pollination, and the proposal of a semi-automated system for preventive rounds against bud rot disease. As a result, a functional prototype for level measurement in a pan evaporimeter tank was designed and validated, capable of automatically recording water level, ambient temperature, and relative humidity, achieving a correlation greater than 95% compared to the manual method and an autonomy of approximately 50 hours. Additionally, a comparative analysis of the energy consumption of different electric sprayers was conducted, identifying more energy-efficient equipment in terms of energy per liter applied. Finally, a semi-automated system was proposed to improve coordination and safety during preventive bud rot control operations. The results demonstrate the potential of mechatronics as a key tool for the modernization of the Colombian oil palm sector, promoting a more efficient, sustainable, and data-driven agricultural model.

Keywords: mechatronics, agricultural automation, IoT, oil palm

Introducción

En las últimas décadas, el cultivo de palma de aceite ha registrado un notable crecimiento a nivel mundial, consolidándose como una de las principales actividades agroindustriales gracias a su elevado rendimiento por hectárea y su amplia gama de aplicaciones en la industria alimentaria, cosmética y energética. Según la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma), Colombia ha experimentado una expansión significativa en la superficie cultivada, posicionándose como el quinto líder mundial en el sector palmicultor [1].

Sin embargo, este crecimiento ha traído consigo una serie de desafíos estructurales, entre los que destaca la creciente escasez de mano de obra en las zonas rurales [3]. Factores como la migración hacia las ciudades, el envejecimiento de la población campesina y la falta de relevo generacional han generado una disminución en la disponibilidad de trabajadores para las labores agrícolas, afectando directamente la eficiencia y sostenibilidad del cultivo.

Ante este panorama, la mecanización agrícola se presenta como una alternativa estratégica para enfrentar los retos del sector. Países como Malasia han logrado avances significativos en la implementación de tecnologías que optimizan procesos como el transporte interno de racimos de fruta fresca, la aplicación de fertilizantes, el control de malezas y la cosecha, logrando así mejorar la productividad y reducir los costos operativos [3].

En este contexto, el presente trabajo de grado tiene como objetivo participar desde el ámbito de la mecatrónica en la innovación, personalización y optimización de tecnologías para aumentar la productividad en el sector palmicultor colombiano, contribuyendo a la consolidación de una agroindustria más eficiente, competitiva y sostenible, aportando al fortalecimiento de la cadena de valor de la palma de aceite en Colombia.

1. Mecatrónica en la agroindustria: Integración de tecnologías en el cultivo de la palma de aceite colombiano

1.1. Planteamiento del problema

El cultivo de palma de aceite representa una de las principales actividades agroindustriales en Colombia, con un impacto significativo en la economía rural y en la generación de empleo [1]. No obstante, a pesar de su crecimiento continuo, el sector enfrenta una problemática estructural que amenaza su sostenibilidad: la disminución progresiva de la mano de obra disponible en las zonas rurales. Este fenómeno ha generado una brecha crítica entre las necesidades operativas del cultivo y la capacidad humana para atenderlas.

A esta situación se suma el hecho de que muchas de las labores en campo continúan realizándose de forma artesanal, con métodos que demandan un alto esfuerzo físico, tiempos prolongados de ejecución y una baja eficiencia operativa. Actividades como el transporte de racimos, la aplicación de fertilizantes, el control de malezas y la cosecha, requieren gran cantidad de operarios y están sujetas a condiciones climáticas, topográficas y de infraestructura que dificultan su realización [3]. Esta dependencia de métodos tradicionales no solo limita la productividad del cultivo, sino que también incrementa los costos de producción y reduce la competitividad del sector frente a mercados internacionales más tecnificados.

1.2. Justificación

La mecanización, entendida como el uso estratégico de herramientas y máquinas adaptadas a las labores agrícolas, es cada vez más necesaria en la palmicultura colombiana ya que se perfila como una solución eficaz para optimizar procesos, reducir cargas físicas sobre los trabajadores, y

mejorar los indicadores de rendimiento y productividad del cultivo. Sin embargo, el desarrollo y adopción de estas tecnologías no es tan alto como se esperaría, lo que plantea la necesidad de impulsar iniciativas que promuevan su implementación efectiva.

A pesar de los avances tecnológicos disponibles a nivel internacional para otros cultivos [2], el uso de dispositivos y equipos especializados en las plantaciones de palma de aceite en Colombia continúa siendo limitado [3]. La débil implementación de tecnologías que optimicen procesos clave como la polinización, la cosecha, el transporte de racimos, la fertilización y el control de malezas ha contribuido a mantener elevados costos de producción y bajos niveles de productividad. Esta situación afecta directamente la competitividad del sector palmicultor frente a economías más tecnificadas, donde la mecanización ha demostrado ser un factor determinante para mejorar la eficiencia y sostenibilidad agrícola.

Es por ello por lo que resulta fundamental promover el desarrollo, optimización y adaptación de tecnologías que faciliten las labores del campo, mejoren las condiciones de trabajo y aumenten la eficiencia operativa. La mecanización no solo representa una solución técnica, sino también una estrategia social para incentivar el retorno de la población al campo, al ofrecer condiciones laborales más dignas, seguras y atractivas. Este trabajo de grado busca contribuir a ese propósito, brindando apoyo en el desarrollo y la evaluación de alternativas tecnológicas que respondan a las necesidades reales del sector y que impulsen su transformación hacia una agroindustria más moderna y sostenible.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo general*

Apoyar el desarrollo, optimización y adaptación de tecnologías para aumentar la productividad en el sector palmicultor.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Ampliar conocimientos en el área mecatrónica y agrícola.
- Diseñar y validar un dispositivo de medición de nivel para diferentes usos.
- Validar el consumo energético de aspersores eléctricos en labores de polinización.
- Automatizar el sistema de rondas preventivas contra la pudrición del cogollo (PC).

2. Marco referencial

2.1. Marco teórico

2.1.1. *Automatización agrícola y su relevancia en la palma de aceite*

La automatización agrícola consiste en la incorporación de dispositivos y algoritmos que sustituyen tareas manuales por procesos controlados electrónicamente. En cultivos de palma de aceite, esta práctica contribuye a reducir la dependencia de mano de obra, optimizar el uso de insumos y garantizar la sostenibilidad. La tendencia global hacia la agricultura de precisión

refuerza la necesidad de sistemas que permitan el monitoreo en tiempo real y la toma de decisiones basada en datos.

En este contexto, la implementación de tecnologías de mecanización en palma de aceite no solo responde a la escasez de mano de obra, sino que también se alinea con los principios de eficiencia operativa y sostenibilidad. Equipos como las fertilizadoras de tasa variada y los atomizadores electrostáticos permiten aplicar insumos de manera precisa, optimizando recursos y disminuyendo impactos ambientales. Este enfoque contribuye a la agricultura de precisión, donde la toma de decisiones se fundamenta en datos y en la capacidad de ejecutar labores en ventanas de tiempo críticas. Además, la mecanización implica un proceso integral que abarca la selección adecuada del equipo, la capacitación del personal y la planificación estratégica de las operaciones, factores que determinan el éxito en la adopción tecnológica y la rentabilidad del cultivo [4].

Por otra parte, la automatización en palma de aceite no se limita a la incorporación de maquinaria, sino que implica un cambio estructural en la gestión del cultivo. Este cambio se fundamenta en la integración de indicadores de productividad, como potencia requerida, consumo de combustible y costos por hectárea, que permiten evaluar la eficiencia de cada alternativa tecnológica. Por ejemplo, el uso de fertilizadoras de tasa variada, aunque representa un mayor costo por hora, reduce significativamente el costo por hectárea gracias a su alto rendimiento, lo que evidencia la relación directa entre inversión tecnológica y optimización de recursos. Asimismo, la adopción efectiva requiere planificación, administración del parque de maquinaria y capacitación del personal, factores que determinan la sostenibilidad y la competitividad del sistema agroindustrial [4].

2.1.2. Arquitectura de sistemas IoT en entornos agrícolas

La arquitectura de un sistema IoT aplicado a la agroindustria se organiza en tres capas funcionales, percepción, red y aplicación. Esta estructura se corresponde con el modelo ampliamente aceptado en la literatura [5].

La capa de percepción integra sensores para temperatura, humedad, luz, dióxido de carbono y pH del suelo, así como cámaras para monitoreo visual. Estos dispositivos capturan información del entorno y la transmiten a través de la capa de red, encargada de garantizar la conectividad y la interoperabilidad entre los componentes del sistema. Finalmente, la capa de aplicación se complementa con plataformas en la nube que ofrecen servicios de visualización, análisis y control remoto, permitiendo a los agricultores acceder a datos en tiempo real, configurar parámetros y ejecutar acciones correctivas desde interfaces web o aplicaciones móviles. Este enfoque podría optimizar la gestión de invernaderos, reducir costes y mejorar la productividad mediante decisiones basadas en datos [5].

Un elemento clave en esta arquitectura es la incorporación de algoritmos de control adaptativo, como el PID difuso, que regulan automáticamente factores ambientales (temperatura, humedad, luz y concentración de CO₂). Estos algoritmos ajustan dinámicamente los parámetros del sistema para mantener condiciones óptimas de cultivo, incrementando la estabilidad y reduciendo la intervención manual [5].

Además, la arquitectura se complementa con un sistema de gestión de datos que integra plataformas de negocio y administración. Este sistema permite la supervisión remota, la configuración de umbrales, la gestión de alarmas y el control de dispositivos desde cualquier ubicación. La combinación de IoT con técnicas de aprendizaje automático potencia la capacidad

predictiva del sistema, facilitando la detección de anomalías y la optimización del uso de recursos [5].

2.1.3. Tecnologías para medición y control

Los dispositivos de medición son fundamentales para garantizar la eficiencia en la gestión de recursos agrícolas. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran los sensores ultrasónicos, capacitivos y de presión para el control de nivel, así como sensores de temperatura, humedad del suelo y humedad relativa del aire. Estos elementos permiten recopilar datos precisos sobre las condiciones del cultivo, facilitando la toma de decisiones orientadas a optimizar el riego, prevenir estrés hídrico y mantener un ambiente adecuado para el desarrollo de la palma de aceite.

2.2. Marco conceptual

- **Agricultura de precisión:** Conjunto de prácticas que emplean tecnologías avanzadas para optimizar el uso de recursos (agua, fertilizantes, energía) y mejorar la productividad mediante la toma de decisiones basada en datos.
- **Automatización agrícola:** Proceso mediante el cual se sustituyen tareas manuales por sistemas controlados electrónicamente, integrando sensores, actuadores y algoritmos para garantizar eficiencia y sostenibilidad.
- **Mecatrónica:** Disciplina que combina mecánica, electrónica, informática y control para diseñar sistemas automatizados que interactúan con el entorno físico.
- **Sensor ultrasónico:** Dispositivo que mide distancias mediante ondas sonoras, utilizado para controlar niveles de líquidos en tanques de riego o fertilización.

- **Sensor capacitivo:** Tecnología que detecta variaciones en la capacitancia para medir niveles de sólidos o líquidos, útil en sistemas de almacenamiento agrícola.
- **Microcontrolador:** Unidad electrónica programable que procesa señales de sensores y controla actuadores. Ejemplos: Arduino, ESP32, Raspberry Pi.
- **Base de datos agrícola:** Estructura organizada para almacenar información sobre variables ambientales, consumo energético y rondas preventivas, permitiendo análisis histórico y toma de decisiones.
- **Polinización asistida:** Técnica que emplea para mejorar la eficiencia en la polinización de cultivos, reduciendo la dependencia de agentes naturales.
- **Sistema de rondas preventivas:** Labor en el que se realizan inspecciones periódicas para detectar plagas o anomalías en el cultivo.
- **Eficiencia energética:** Relación entre la energía consumida y el trabajo útil realizado por el sistema, fundamental para reducir costos en procesos automatizados.
- **Protocolos de comunicación IoT:** Conjunto de normas para transmitir datos entre dispositivos conectados.
- **Agricultura sostenible:** Modelo productivo que busca equilibrar la rentabilidad económica con la protección del medio ambiente y el bienestar social, apoyado por tecnologías limpias.

3. Método

Para cumplir los objetivos específicos se adoptó una metodología mixta, combinando revisión documental, diseño experimental y validación en campo. Cada objetivo se abordó

mediante un conjunto de actividades estructuradas que garantizaron la coherencia entre el planteamiento teórico y la aplicación práctica.

3.1. Ampliar conocimientos en el área mecatrónica y agrícola

Este objetivo busca fortalecer la base conceptual y técnica necesaria para el desarrollo de las actividades durante el periodo de pasantías.

- **Revisión bibliográfica:** Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos científicas (Scopus, ScienceDirect, Google Scholar) y literatura especializada sobre procesos de cultivo, cosecha y mecanización en palma de aceite. Priorizando artículos publicados en los últimos cinco años para asegurar la vigencia de la información. Estos artículos se socializaron durante el periodo de prácticas.
- **Capacitación técnica:** Se llevaron a cabo talleres internos sobre diseño mecánico y automatización, complementados con la preparación para la certificación CSWA (Certified SolidWorks Associate), lo que permitió ampliar las competencias en modelado CAD y diseño de componentes.

3.2. Diseñar y validar un dispositivo de medición de nivel

Para este objetivo se empleó una metodología modular de desarrollo de producto, compuesta por las siguientes etapas:

- **Definición de variables de interés:** Se establecieron parámetros críticos como nivel de agua, temperatura y humedad, considerando su relevancia en la gestión agrícola.
- **Análisis de sensores disponibles en el mercado:** Se evaluaron opciones según criterios de precisión, costo, compatibilidad y facilidad de integración.

- **Diseño electrónico:** Incluyó la selección de componentes, elaboración de esquemas de conexión y pruebas preliminares de funcionamiento.
- **Diseño mecánico:** Se desarrollaron modelos CAD en SolidWorks, considerando resistencia y facilidad de montaje.
- **Desarrollo del sistema de control:** Se programó la lógica de operación en una ESP32, incorporando algoritmos para la adquisición y procesamiento de datos. Al mismo tiempo se desarrolló una App de Android para configurar el dispositivo desde un teléfono celular.
- **Integración de subsistemas:** Se ensamblaron los módulos electrónicos, mecánico y de software, verificando la interoperabilidad.
- **Validación del prototipo:** Se realizaron pruebas funcionales en condiciones controladas y en campo, evaluando precisión, estabilidad y confiabilidad mediante análisis estadístico.

3.3. Validar el consumo energético de aspersores eléctricos en polinización

Esta etapa se orientó a la caracterización del desempeño energético de equipos utilizados en la polinización artificial para ello se realizaron las siguientes actividades:

- **Inventario de equipos:** Se identificaron los modelos disponibles en el campo experimental, recopilando información técnica relevante suministrada por los fabricantes.
- **Cálculo teórico del consumo energético:** Se estimó el consumo a partir de fichas técnicas y parámetros del fabricante, aplicando fórmulas de potencia y tiempo de operación.
- **Validación experimental:** Se efectuaron mediciones directas en uno o más equipos bajo condiciones reales, utilizando instrumentos de monitoreo eléctrico para contrastar los valores teóricos con los observados.

3.4. Automatizar el sistema de rondas preventivas contra la pudrición del cogollo (PC)

El objetivo final consistió en proponer mejoras tecnológicas para optimizar el sistema de aplicación de rondas preventivas contra la pudrición de cogollo (PC) elaborando un sistema de control para la aplicación de productos usando electroválvulas y temporizadores. La metodología propuesta para cumplir este objetivo consistió en:

- **Analizar el equipo actual:** Se evaluó el funcionamiento del sistema en campo, identificando limitaciones en eficiencia y seguridad.
- **Diseñar una propuesta de automatización:** Se plantearon soluciones que integran sensores, actuadores y controladores, priorizando la reducción de tiempos y la mitigación de riesgos.
- **Implementación y verificación:** Tras la aprobación del diseño, se integraron los sistemas y se realizaron pruebas operativas para validar la efectividad de las mejoras.

4. Resultados

4.1. Ampliar conocimientos en el área mecatrónica y agrícola

4.1.1. Revisión bibliográfica

Se revisaron 2 artículos científicos y 10 libros especializados en agroindustria de palma de aceite. Los hallazgos más relevantes se encuentran resumidos en la tabla 1:

Tabla 1. *Resumen libros y artículos*

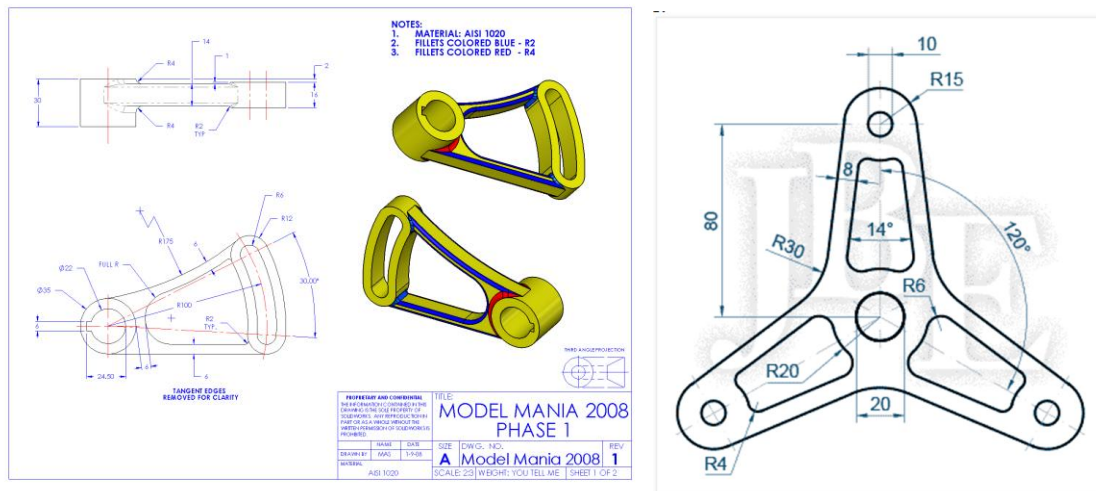
Tema	Libro/Artículo	Hallazgos relevantes
Fenología y genética	Mejores prácticas agroindustriales del cultivo de la palma de aceite en Colombia (2017). ISBN: 978-958-8360-67-6	La comprensión detallada del ciclo fenológico de <i>Elaeis guineensis</i> y del híbrido OxG es clave para optimizar la producción y reducir riesgos fitosanitarios.
	Fenología de la palma de aceite africana y del híbrido interespecífico (2010). ISBN: 978-958-8360-24-9	
	Identificación temprana y manejo de la pudrición del cogollo de la palma de aceite (2010). ISBN: 978-958-8360-13-3	
Eficiencia en cosecha	Estrategias para optimizar el proceso de cosecha de palma de aceite (2010). ISBN: 978-958-8360-17-1	Las estrategias tecnológicas y la capacitación del personal reducen costos y mejoran la calidad del fruto.
	Cosecha del fruto de la palma de aceite (2010). ISBN: 978-958-8616-13-1	
Innovación tecnológica	Introducción al análisis de datos con Rstudio (2021). ISBN: 978-958-8360-83-6	Herramientas de análisis de datos (como RStudio) permiten tomar decisiones basadas en evidencia, mejorando la productividad y la trazabilidad.
	La mecanización del cultivo de palma de aceite. (Alfonso et al., 2009).	La palma de aceite crece rápido, pero la falta de mano de obra eleva costos. La mecanización en labores clave como transporte, fertilización y cosecha es esencial para competitividad y sostenibilidad.
Manejo fitosanitario	Monitoreo y manejo curativo de la pudrición de cogollo en <i>Elaeis guineensis</i> e híbrido interespecífico OxG en Colombia (Sarria et al., 2024). ISBN: 978-628-7711-01-3	La pudrición del cogollo sigue siendo la principal amenaza; la detección temprana y el manejo curativo son esenciales para evitar pérdidas masivas.
Polinización asistida:	Polinización asistida en palma de aceite. ISBN: 978-958-8616-44-5	Se confirma que la polinización artificial incrementa significativamente el rendimiento en zonas con baja presencia de insectos polinizadores y en cultivares híbridos OxG que presentan asincronía floral.

Sostenibilidad	Energías renovables alternativas: Futuro sostenible para Colombia. ISBN: 978-958-8616-70-4 Calificación del nivel tecnológico de las plantaciones de palma de aceite. ISBN: 978-958-8360-37-9	El uso de energías renovables y prácticas agroindustriales responsables son tendencias obligatorias para garantizar la competitividad y el cumplimiento normativo.
IOT	IoT-based Automated Greenhouse for Deep Water Culture Hydroponic System. DOI: 10.1109/SCLA53004.2021.9540187	Se desarrolló un invernadero hidropónico automatizado con IoT, usando sensores y NodeMCU para controlar temperatura, humedad y nivel de solución. El sistema permite monitoreo remoto mediante ThingSpeak y Blynk, optimizando cultivos en espacios reducidos.

4.1.2. Resultados de la capacitación técnica

Se completaron cinco talleres internos sobre diseño mecánico en los cuales se profundizó en las herramientas básicas de SolidWorks. Conceptos como la **intención de diseño** y el **modelado paramétrico** fueron de suma importancia a la hora de desarrollar planos y piezas de forma correcta (**Figura 1**). Durante la realización de ejercicios se evaluó la optimización de operaciones de modelado y el uso de las ecuaciones paramétricas.

Al finalizar las cinco sesiones se realizó el examen para obtener el *Certified SOLIDWORKS Associate* (CSWA), certificación oficial de SOLIDWORKS que valida conocimientos básicos e intermedios en diseño mecánico y modelado 3D. La certificación se obtuvo el día 29/08/2025 tal como se puede apreciar en la

Figura 1. Planos de ejercicios realizados durante los talleres.

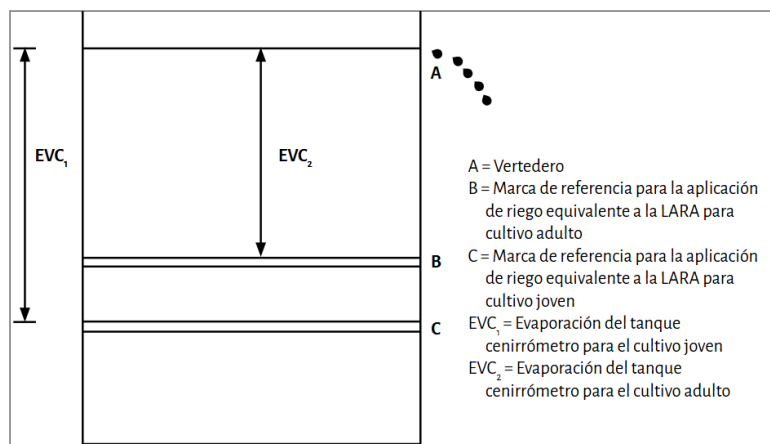
Tomado de: Grupo Abstract (2026)

Figura 2. Certificado CSWA.

4.2. Diseñar y validar un dispositivo de medición de nivel

El tanque cenirrómetro constituye una herramienta clave para la estimación de la evaporación, parámetro fundamental en la gestión hídrica y la programación del riego en cultivos como la palma de aceite. La evaporación se calcula a partir de la variación del nivel de agua en el tanque, por lo que la precisión en la medición de esta altura es determinante para obtener datos confiables.

Figura 3. Esquema de tanque cenirrómetro desarrollado por Cenicaña.



Tomado de: [6]

Tradicionalmente, estas mediciones se realizan de forma manual, lo que implica limitaciones en frecuencia de registro, exactitud y disponibilidad de datos en tiempo real. Para dar una solución a la toma constante de estos registros se desarrolló de un dispositivo automatizado que permite medir el nivel del cenirrómetro, junto con variables ambientales como temperatura y humedad. Con este dispositivo se busca reducir errores humanos, optimizar la toma de decisiones y facilitar la integración con sistemas que permitan tomar mejores decisiones a los palmicultores.

4.2.1. Definición de variables de interés

- **Nivel de agua** en el tanque cenirrómetro, indispensable para estimar la evaporación mediante la variación temporal de la altura.
- **Temperatura ambiente**, variable que influye directamente en la evaporación.
- **Humedad relativa**, factor que influye directamente en la tasa de evaporación y permite contextualizar los datos obtenidos.

4.2.2. Análisis de sensores disponibles en el mercado

Se realizó un análisis de sensores considerando criterios como precisión, rango de medición, costo y facilidad de integración. Para la medición de nivel se seleccionó un **sensor ultrasónico HY-SRF05**, debido a su capacidad para medir distancias sin contacto, resistencia a condiciones de campo y bajo mantenimiento.

Figura 4. Sensor HY-SRF05.



Tomado de [7].

Para temperatura y humedad se optó por el **sensor DHT22**, que ofrece una solución económica y suficientemente precisa para aplicaciones agrícolas donde se requiere monitoreo básico.

Figura 5. *DHT22.*



Tomado de: [8]

4.2.3. Diseño electrónico

Para el control electrónico se utilizó un microcontrolador **ESP32** para la adquisición y procesamiento de datos, que además incluye wifi y Bluetooth para la transmisión inalámbrica hacia una aplicación móvil. Para almacenar datos de forma local se adicionó un lector de tarjetas microSD y para el sistema de alimentación se incorporó un conector USB hembra con el fin de energizar el sistema mediante una *powerbank* de 10.000 mAh, que proporciona autonomía aproximada de 50 horas con lecturas cada 30 segundos.

Figura 6. *ESP32.*



Tomado de [9]

Se desarrolló el esquema eléctrico del sistema y se procedió al diseño de la PCB mediante la herramienta **Proteus**, lo que permitió optimizar la distribución de componentes y conexiones. La selección de los elementos se realizó bajo criterios de compatibilidad eléctrica y dimensional, garantizando que la placa cumpliera con las especificaciones físicas requeridas para su integración en el prototipo. Este proceso aseguró una correcta disposición de pistas y nodos, minimizando riesgos de interferencia electromagnética y facilitando la implementación física del circuito.

Figura 7. Esquema de conexiones realizado en Proteus.

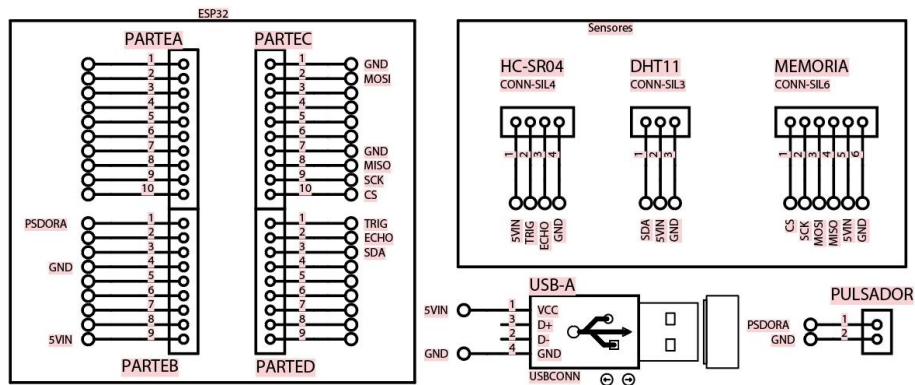


Figura 8. Esquema PCB / PCB fabricada.

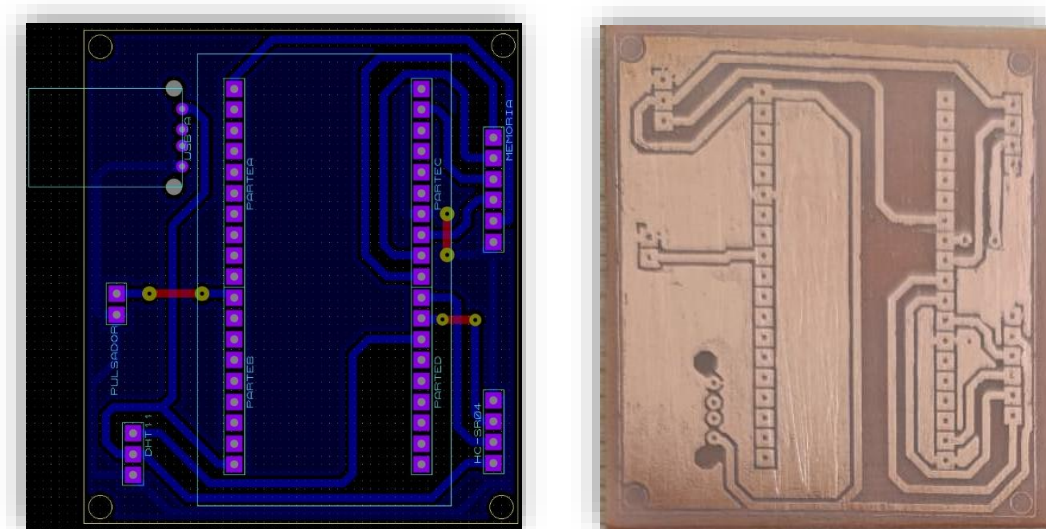
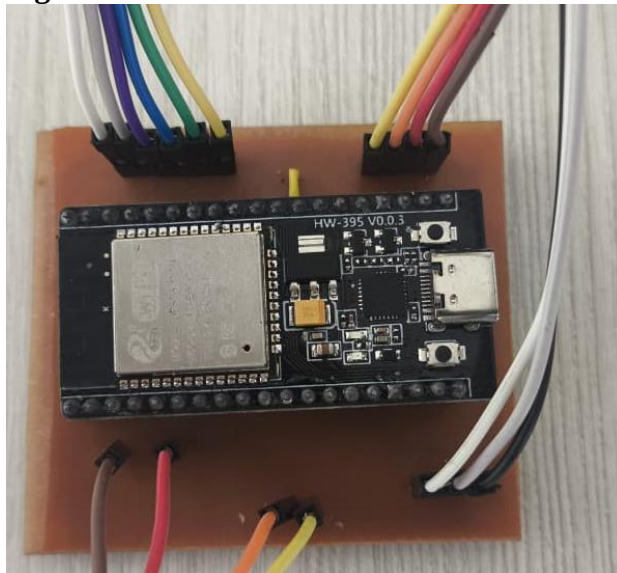
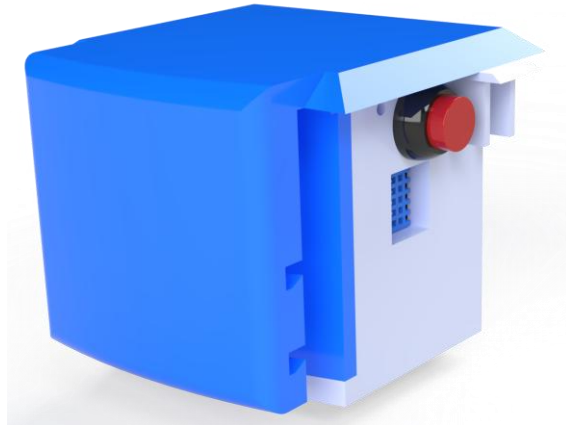


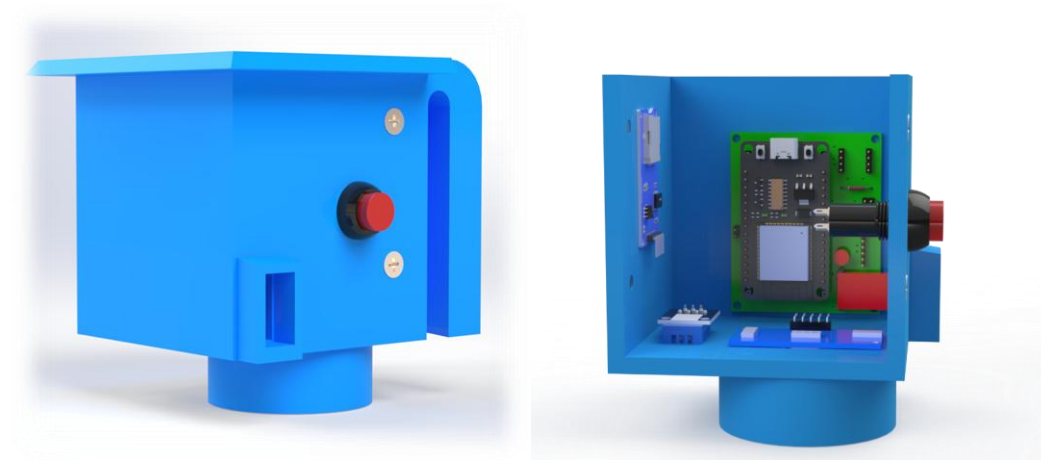
Figura 9. *Conexiones en PCB*

4.2.4. Diseño mecánico

Se desarrolló una carcasa protectora mediante impresión 3D, diseñada para resguardar los componentes electrónicos frente a la humedad y la radiación solar, que además facilita la instalación sobre el tanque cenirrómetro sin interferir con la medición. El diseño fue realizado en SolidWorks, haciendo uso de las características del diseño paramétrico teniendo en cuenta los componentes electrónicos a usar y la PCB previamente diseñada. Se realizaron varias iteraciones del diseño, ya que durante las primeras pruebas funcionales se encontraron algunos problemas en el sistema de soporte sobre el tanque, y en el espacio interno luego de cablear el circuito.

Figura 10. *CENIMED V1.0*

En las versiones siguientes se fueron mejorando las juntas entre las piezas, se agregaron perforaciones de 4mm para la correcta sujeción de estas, permitiendo una unión que garantiza una entrada de agua nula, protegiendo los componentes en periodos de alta radiación, pero también de fuertes lluvias. Así mismo se extendió un marco redondo de 3” para insertar un tubo PVC que permita direccionar la onda ultrasónica del sensor y además protegerla de las perturbaciones del tanque en periodos de lluvia.

Figura 11. *CENIMED V3.0.*

Los archivos de diseño se generaron en formato STL, y se pasaron por el *Slicer Creality* *Print*, las piezas se fabricaron con material PLA en una Creality K1 Max.

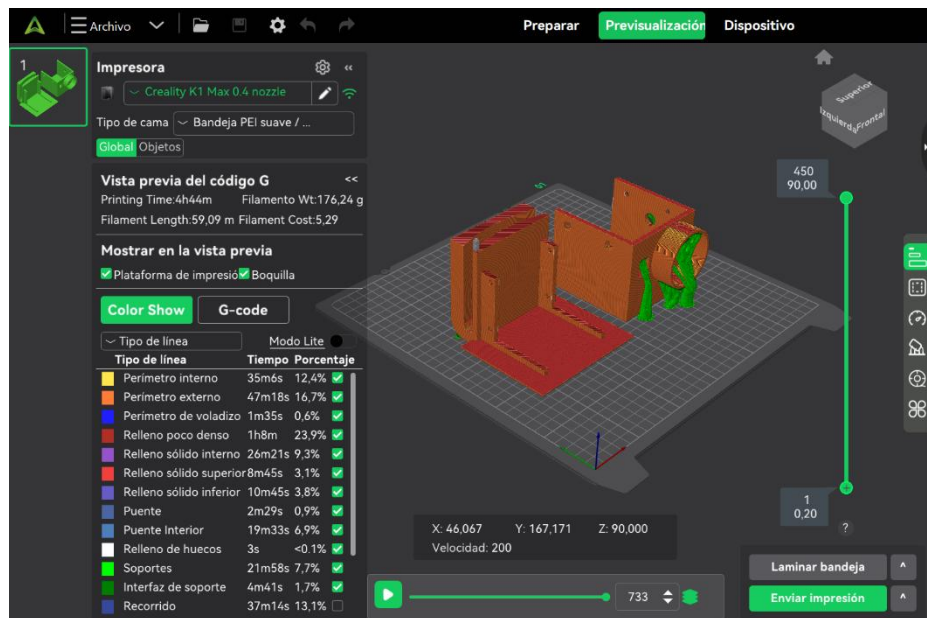
Figura 12. *Especificaciones de impresión 3D para las piezas del CENIMED.*

Figura 13. *CENIMED, prototipo funcional.*



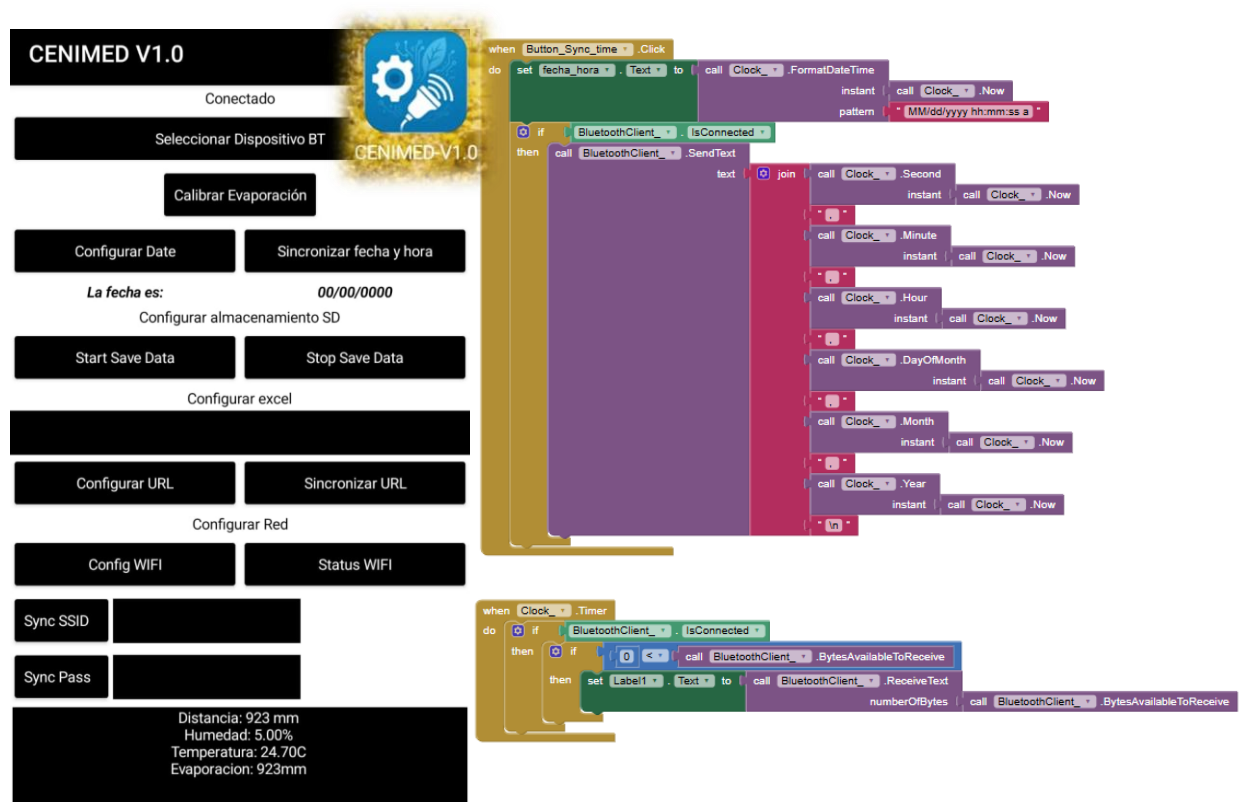
4.2.5. Desarrollo del sistema de control

Usando el entorno de desarrollo Arduino IDE, se implementó un algoritmo (ver Apéndice A) que permite la adquisición periódica de datos provenientes del sensor ultrasónico (nivel) y del sensor DHT22 (temperatura y humedad relativa). El sistema fue programado para realizar lecturas cada 30 segundos, garantizando la estabilidad en la transmisión.

Los datos obtenidos se envían en tiempo real mediante el módulo Bluetooth integrado del microcontrolador hacia una aplicación móvil desarrollada en la plataforma MIT App Inventor.

Esta aplicación cumple dos funciones principales:

1. Visualización de datos en tiempo real para el monitoreo del tanque cenirrómetro.
2. Configuración de modos de almacenamiento, permitiendo al usuario definir el lugar para el almacenamiento de los datos, ya sea de forma local usando una memoria microSD, o de manera remota, usando una configuración a través de Wifi (Ver apéndice B).

Figura 14. Aplicación CENIMED desarrollada en APP Inventor

La lógica de control integra rutinas para la gestión de errores en la comunicación y valida en todo momento el correcto almacenamiento de los datos, asegurando la confiabilidad del sistema en condiciones de campo.

4.2.6. Integración de subsistemas

Una vez desarrollados los componentes electrónicos, mecánicos y el sistema de control, se procedió a la integración total del dispositivo (ver apéndice C). La carcasa impresa en 3D se adaptó para alojar el microcontrolador, sensores y módulo Bluetooth, garantizando protección frente a humedad y radiación solar. El sistema fue instalado sobre el tanque cenirrómetro y sometido a pruebas en condiciones reales de campo.

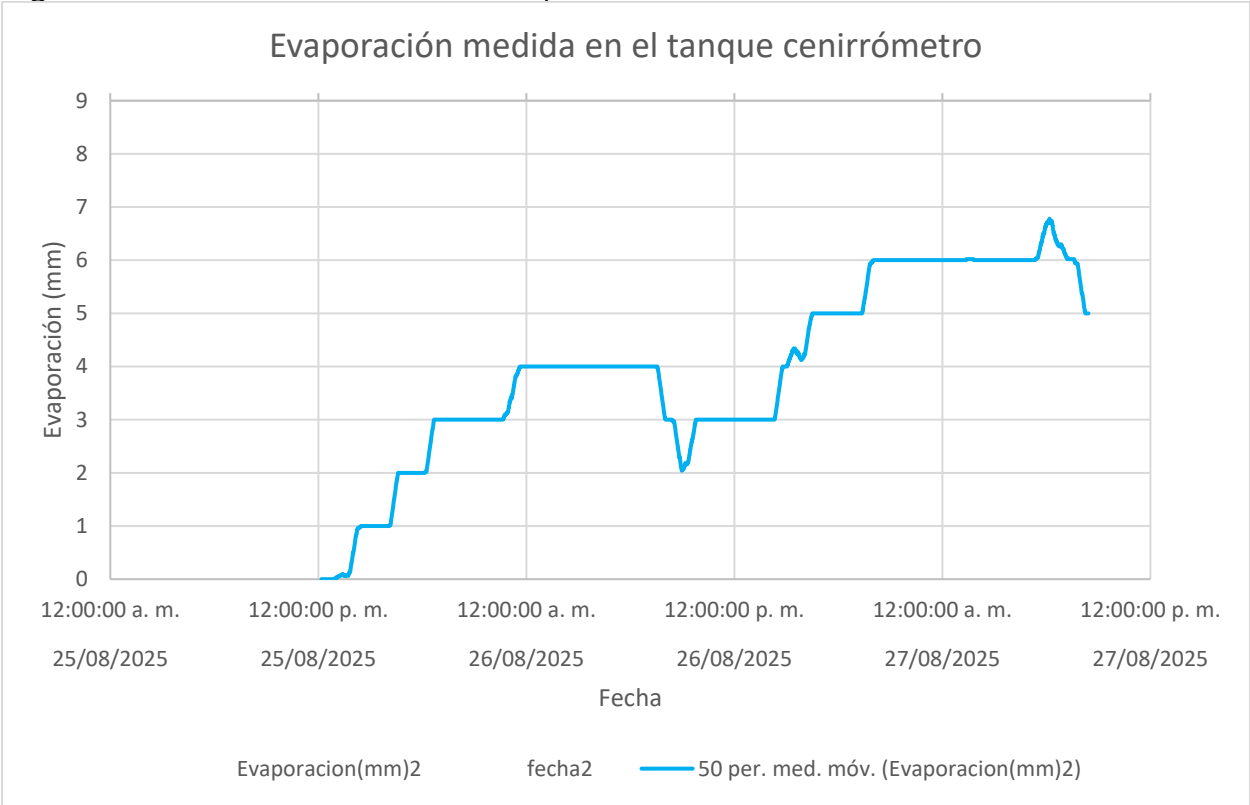
Figura 15. *Pruebas de CENIMED en campo.*



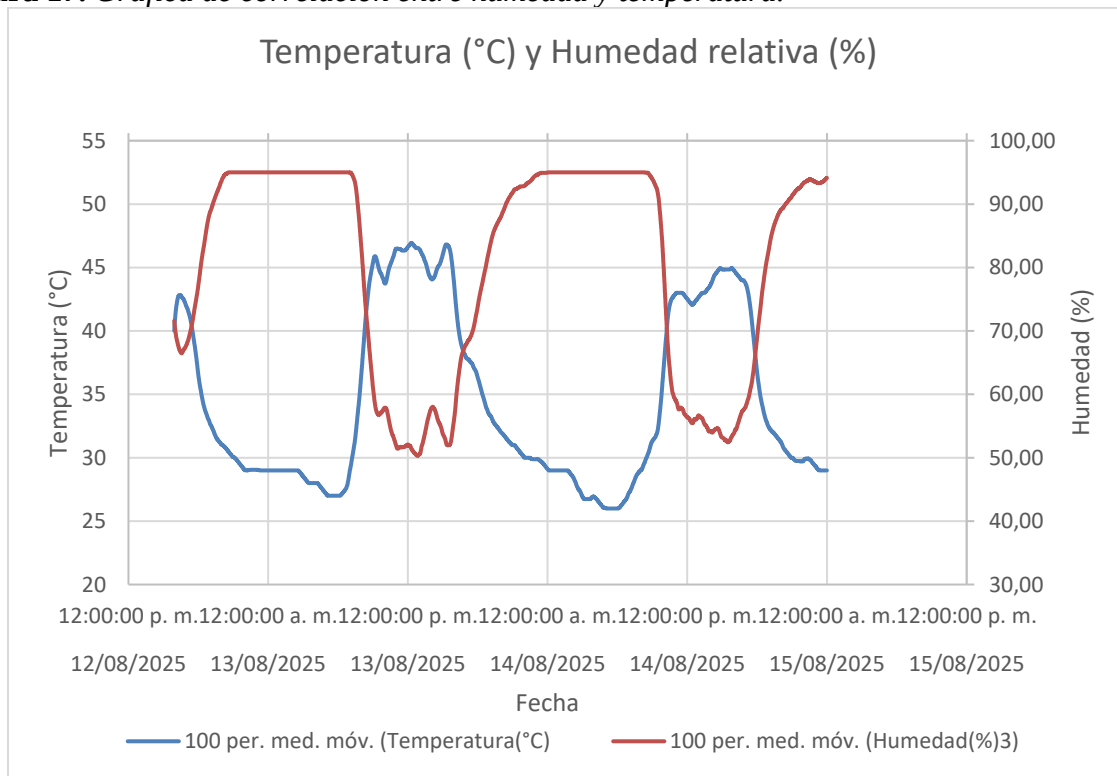
4.2.7. Validación del prototipo

Durante la validación del funcionamiento de prototipo se tuvo en cuenta la precisión en la medición del nivel, comparando las lecturas del dispositivo con el método manual usando un flexómetro. La resta de las lecturas estabilizadas en los últimos momentos del día, con respecto a los iniciales, tienen una alta oportunidad de reemplazar la lectura tradicional.

Figura 16. Pruebas de CENIMED en campo.



Por otro lado, se corroboró la estabilidad en la transmisión de datos, obteniendo sesiones continuas de 48 horas sin pérdidas en la comunicación.

Figura 17. Grafica de correlación entre humedad y temperatura.

Finalmente, se confirmó la autonomía energética, corroborando una duración aproximada de 50 horas con una *powerbank* de 10.000 mAh y frecuencia de muestreo de 30 segundos.

4.3 Análisis de el consumo energético de aspersores eléctricos en labores de polinización.

Para determinar la eficiencia energética por unidad de trabajo y establecer implicaciones operativas para la selección del equipo más adecuado en términos de sostenibilidad y rendimiento. análisis comparativo del consumo energético de cinco modelos de aspersores eléctricos utilizados en labores de polinización.

4.3.1. La Pila (Royal Condor)

Figura 18. La Pila (Royal Condor)



Tomado de [10]

Este equipo es una fumigadora eléctrica diseñada para labores de polinización en cultivos que requieren precisión y autonomía. Con una capacidad de **18 litros** y un peso de **4,5 kg**, incorpora una bomba eléctrica de doble diafragma alimentada por una batería de **12VDC**, que ofrece hasta **6 horas de operación continua**. Su diseño robusto lo hace ideal

para jornadas prolongadas, aunque su peso puede ser una limitación en terrenos difíciles. Incluye indicador LED de batería y es compatible con boquillas regulables, lo que facilita ajustes en el tamaño de gota.

4.3.2. Zeppelin ESPULV12LEL

Figura 19. Zeppelin ESPULV12LEL



Tomado de: [11]

Este modelo se caracteriza por su **ligereza (3,1 kg)** y una capacidad de **12 litros**, lo que lo convierte en una opción práctica para áreas pequeñas o trabajos de corta duración. Utiliza una bomba eléctrica de diafragma con potencia de **30W** y batería de **12VDC**, capaz de aplicar hasta **72 litros por carga** según el fabricante. Sin embargo, carece de indicadores

de batería, lo que puede dificultar la gestión operativa. Es adecuado para usuarios que priorizan maniobrabilidad sobre autonomía.

4.3.3. *Evolution 10LT (Matabi)*

Figura 20. *Evolution 10LT (Matabi)*



Tomado de: [12]

Con un peso de **2,9 kg** y capacidad de **10 litros**, este equipo es uno de los más ligeros del análisis. Su bomba eléctrica de doble diafragma (36W, 12VDC) permite aplicar hasta **100 litros por carga**, lo que lo posiciona como eficiente para operaciones medianas. Incluye indicador LED de batería y ofrece un tamaño de gota fina, ideal para polinización controlada. Su principal ventaja

es la portabilidad, aunque su capacidad limitada puede requerir recargas frecuentes en grandes superficies.

4.3.4. *Evolution 15 LTC (Matabi)*

Figura 21. *Evolution 15 LTC (Matabi)*



Tomado de: [13]

Este equipo combina **alta autonomía** con **capacidad intermedia (15 litros)** y un peso de **3,9 kg**. Su motor de **44W** y batería de **18VDC** permiten aplicar hasta **150 litros por carga**, lo que lo convierte en el más eficiente del grupo ($\approx 2,93$ Wh/L). Incluye indicador LED y diseño ergonómico, siendo ideal para operaciones prolongadas donde se busca optimizar consumo

energético y reducir tiempos muertos. Su única desventaja es el peso ligeramente superior frente a modelos más pequeños.

4.3.5. FT-20B (Fengtian)

Figura 22. FT-20B (Fengtian)



Tomado de: [14]

Con la mayor capacidad del análisis (**20 litros**) y un peso de **4,1 kg**, este equipo está diseñado para cubrir grandes áreas con menos recargas. Utiliza bomba eléctrica de doble diafragma y batería de **12VDC**, aunque no se dispone de datos completos sobre autonomía, lo que limita la evaluación de su eficiencia energética. Incluye indicador LED y compatibilidad con boquillas regulables. Es una opción atractiva para operaciones extensas, pero requiere validación en campo para confirmar su rendimiento real.

4.3.6. Análisis comparativo de consumos

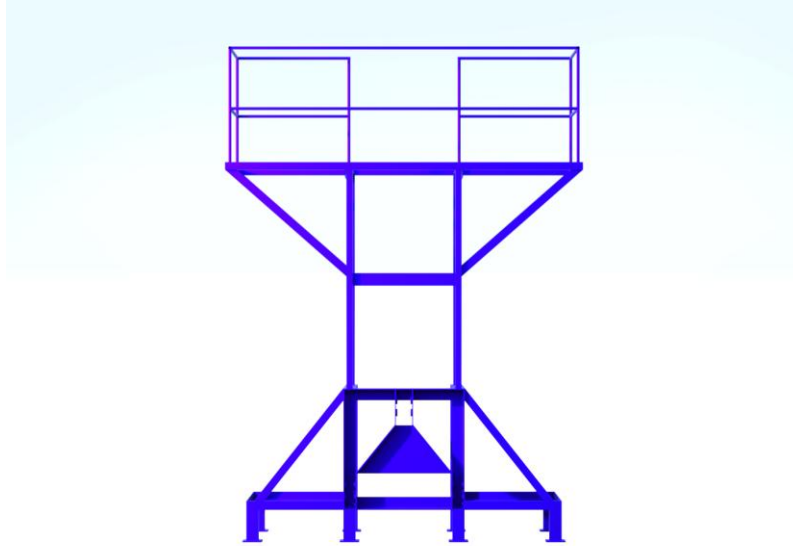
Los resultados muestran diferencias significativas entre los equipos evaluados. El **Evolution 15 LTC** se posiciona como el más eficiente, con un consumo aproximado de **2,93 Wh/L**, gracias a su mayor autonomía y voltaje optimizado, mientras que el **Zeppelin 12L** presenta el consumo más elevado (≈ 5 Wh/L), lo que evidencia una menor eficiencia energética en relación con su capacidad y autonomía. Por su parte, los modelos **La Pila** y **Evolution 10LT** ofrecen valores intermedios ($\approx 3,6$ Wh/L), siendo opciones equilibradas para operaciones de mediana escala. El equipo **FT-20B**, aunque cuenta con la mayor capacidad (20 L), no dispone de datos completos sobre autonomía, lo que limita su análisis. Esta variabilidad en la eficiencia energética tiene un impacto directo en los costos eléctricos y en la sostenibilidad del proceso, ya que los equipos con menor consumo por litro permiten reducir gastos y aumentar la productividad sin comprometer la autonomía. Además, la presencia de indicadores LED en modelos como **La Pila** y **Evolution** facilita la gestión preventiva y evita interrupciones durante la jornada, lo que representa una ventaja operativa significativa.

$$\text{Consumo por litro} = \frac{\text{Potencia}(W) \times \text{Tiempo total}(h)}{\text{Litros aplicados}}$$

4.4. Sistema semiautomatizado de rondas preventivas contra la pudrición del cogollo (PC).

El diseño del sistema semiautomatizado busca mejorar la coordinación entre los dos operarios encargados de la aplicación de rondas preventivas contra la pudrición del cogollo (PC) en cultivos de palma de aceite y el tractorista responsable del desplazamiento de la plataforma propuesta por la compañía.

Figura 23. Propuesta de plataforma. Fuente: CENIPALMA.



Tomado de: Autor.

Lo que se requiere es un sistema *on-off* para cada operario que le permita accionar por un tiempo previamente configurado, una válvula de control. Además, la parte superior de la plataforma debe contar con un sistema de señalización que le permita al operario del tractor saber si puede desplazarse o no.

El sistema propuesto está basado en un circuito controlado por un microcontrolador Arduino Uno, el cual gestiona la activación de dos electroválvulas (EV) que permiten el paso del líquido a través de la lanza de aplicación. La interfaz de control incluye cuatro pulsadores: dos para activar las electroválvulas (EV1 y EV2) y dos para encender los LEDs indicadores (B-LED RED y B-LED GREEN). La función de los indicadores es facilitar la comunicación entre los operarios y el tractorista, superando las limitaciones impuestas por el ruido del motor y el uso de protectores

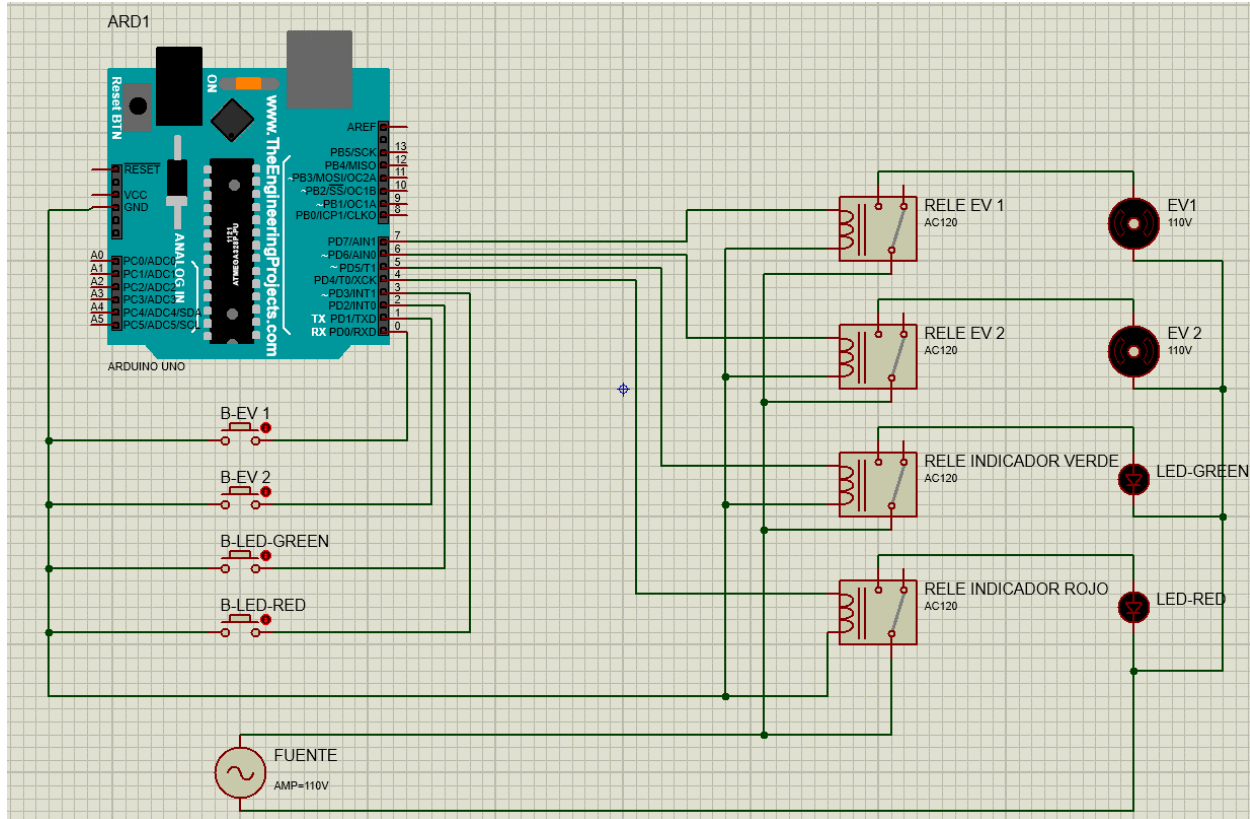
auditivos. El LED verde indica que el tractor puede avanzar, mientras que el LED rojo señala que debe detenerse, permitiendo así una aplicación precisa y segura del producto. Cada pulsador está conectado a una entrada digital del Arduino, que a su vez controla cuatro relés.

Los relés permiten conmutar dispositivos de 110V, específicamente:

- **ELECTROVALVULA 1 y ELECTROVALVULA 2**, encargadas de la dispersión del producto fitosanitario.
- **LED ROJO y LED VERDE**, utilizados como señales visuales para el tractorista.

El sistema se alimenta mediante una planta eléctrica a gasolina de 110V, suficiente para garantizar la operación de los componentes electrónicos y los relés. El plano eléctrico adjunto detalla la disposición de los elementos, las conexiones entre el Arduino, los pulsadores, los relés y los dispositivos de salida, lo que facilita su implementación futura.

Aunque el sistema no fue construido físicamente, se presenta como una propuesta viable y funcional para mejorar la eficiencia operativa en campo, reducir errores en la aplicación del producto y fortalecer las medidas preventivas contra la PC en palma de aceite.

Figura 24. Plano eléctrico del sistema semiautomatizado.

5. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de grado permitió evidenciar que la integración de tecnologías mecatrónicas en el cultivo de palma de aceite representa una alternativa viable y estratégica para enfrentar los desafíos actuales del sector palmicultor colombiano, particularmente aquellos relacionados con la escasez de mano de obra, el incremento de los costos operativos y la necesidad de mejorar la eficiencia productiva.

La revisión bibliográfica y la capacitación técnica realizadas durante el desarrollo del proyecto fortalecieron de manera significativa las competencias en diseño mecánico, automatización y agricultura, permitiendo comprender de forma integral las dinámicas productivas

del cultivo de palma de aceite y las oportunidades de mejora mediante la aplicación de soluciones tecnológicas. Este proceso formativo resultó fundamental para el adecuado planteamiento y ejecución de las actividades experimentales desarrolladas a lo largo del trabajo.

El diseño y validación del dispositivo automatizado de medición de nivel demostraron que es posible reemplazar de manera eficiente los métodos manuales tradicionales por sistemas electrónicos confiables, capaces de ofrecer mediciones precisas, registro continuo de datos y transmisión de información en tiempo real. La alta correlación obtenida frente al método manual, junto con la autonomía energética alcanzada, confirma la viabilidad del prototipo para su implementación en condiciones reales de campo, aportando a una mejor gestión hídrica y a la toma de decisiones basada en datos.

Por otra parte, el análisis del consumo energético de los aspersores eléctricos utilizados en labores de polinización permitió identificar diferencias relevantes en términos de eficiencia entre los equipos evaluados. Estos resultados constituyen una herramienta útil para la selección de tecnologías más eficientes, ya que el consumo energético por litro aplicado tiene un impacto directo en los costos operativos, la productividad y la sostenibilidad de las labores agrícolas.

Finalmente, la propuesta de un sistema semiautomatizado para las rondas preventivas contra la pudrición del cogollo evidenció el potencial de la automatización para mejorar la coordinación, la seguridad y la eficiencia operativa en actividades fitosanitarias críticas. Aunque el sistema no fue implementado físicamente, su diseño técnico demuestra la factibilidad de su aplicación y sienta las bases para futuros desarrollos que fortalezcan las estrategias de manejo preventivo en el cultivo de palma de aceite.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la mecatrónica aplicada a la agroindustria constituye un pilar fundamental para la modernización del sector palmicultor colombiano, contribuyendo al desarrollo de una agricultura más eficiente, tecnificada y orientada a la sostenibilidad económica, ambiental y social.

Referencias

- [1] Fedepalma.org. [Online]. Available: https://fedepalma.org/wp-content/uploads/2025/06/informe-de_gestion_2024-digital_.pdf. [Accessed: 28-Apr-2026].
- [2] “A Review on Advancing Technologies in Precision Agriculture: Applications, Challenges, and the Way Forward,” *Procedia Computer Science*, vol. 265, pp. 572–577, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.07.221.
- [3] Arley Zapata-Hernández, E. Ruiz-Álvarez, N. Arias, M. Mosquera-Montoya, and Alexandre Cooman, “Adoption of mechanization alternatives in oil palm crops in the Colombian Orinoquía natural region,” *OCL*, vol. 31, p. 10, 2024, doi: 10.1051/ocl/2024008.
- [4] A. Zapata, E. Ruiz, L. Calvache, N. Arias, M. Mosquera, and A. Cooman, “FICHA METODOLÓGICA Contexto.” Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.fedepalma.org/bitstream/handle/123456789/142889/Brochure%20Tecnolog%C3%ADas%20de%20mecanizaci%C3%B3n%20disponibles%20en%20el%20cultivo%20de%20palma%20de%20aceite.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] M. Zhu and J. Shang, “Remote Monitoring and Management System of Intelligent Agriculture under the Internet of Things and Deep Learning,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, p. e1206677, May 2022, doi: 10.1155/2022/1206677.
- [6] “Núm. 47 (2024): Principios básicos para el manejo eficiente del riego en el cultivo de palma de aceite | Boletines técnicos,” *Fedepalma.org*, 2024. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/issue/view/1707> (accessed Apr. 28, 2026).

- [7] “HY-SRF05 - Sigma Electrónica,” *Sigma Electrónica*, Mar. 20, 2026. <https://www.sigmaelectronica.net/producto/hy-srf05/> (accessed Apr. 28, 2026).
- [8] “DHT22 - Sigma Electrónica,” *Sigma Electrónica*, Apr. 27, 2026. <https://www.sigmaelectronica.net/producto/dht22/> (accessed Apr. 28, 2026).
- [9] “ESP-32 USB C - Sigma Electrónica,” *Sigma Electrónica*, Apr. 27, 2026. <https://www.sigmaelectronica.net/producto/esp-32-usb-c/> (accessed Apr. 28, 2026).
- [10] progen, “Fumigadora Eléctrica RoyalCondor® La Pila Una Compañera Experta,” *Royalcondor.com*, 2020. <https://www.royalcondor.com/fumigadora-electrica-royalcondor-la-pilauna-compa%C3%B1era-experta/p> (accessed Apr. 28, 2026).
- [11] “Pulverizador mochila a batería Zeppelin lanza telescópica,” *Intermaquinas*, 2026. <https://intermaquinas.es/mochilas-para-fumigar/pulverizador-mochila-a-bateria-zeppelin-lanza-telescopica-262508> (accessed Apr. 28, 2026).
- [12] “Repuestos EVOLUTION 10 LT,” *Matabi.com*, 2020. <https://www.matabi.com/es/rep-83049-rep-83049.html> (accessed Apr. 28, 2026).
- [13] “Repuestos EVOLUTION 15 LTC,” *Matabi.com*, 2020. <https://www.matabi.com/es/rep-evolution-15-ltc-rep-83045.html> (accessed Apr. 28, 2026).
- [14] “FT-20B-Taizhou Fengtian Spraying Machine Co,Ltd.-machine,sprayer machine,” *Chinafengtian.com*, 2023. https://es.chinafengtian.com/products_detail/60.html (accessed Apr. 28, 2026).