

Implementación de una human machine interface (HMI) con una Raspberry Pi 5 para el monitoreo y control de un equipo de secado de cacao tipo marquesina mediante la aplicación de la norma ANSI/ISA-101.01 de 2015

Edwin Durán Rincón

Asesor

Rafael Dionisio Ortega Almeida

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Programa Ingeniería electrónica

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis seres amados. Jehová Dios, su hijo Jesucristo, mi esposa, hijas y padres.

Agradecimientos

Un agradecimiento para el director y codirector de este trabajo de grado, Ingenieros Rafael Dionisio Ortega Almeida y Martha Barrera Hernández, por su paciencia y dirección oportuna.

Resumen

Este trabajo de grado presenta el diseño e implementación de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) basada en una Raspberry Pi 5, destinada al monitoreo y control del proceso de secado de cacao tipo marquesina, en beneficio de pequeños productores rurales. La propuesta se fundamenta en la norma ANSI/ISA-101.01-2015, que establece directrices para el diseño estandarizado y eficiente de interfaces en sistemas de automatización industrial, facilitando soluciones adaptadas a contextos de baja infraestructura tecnológica.

La metodología se desarrolló en tres fases. La primera consistió en la identificación de las variables críticas del proceso de secado: temperatura y humedad relativa dentro de la marquesina, temperatura exterior y tiempo de exposición del cacao. En la segunda fase, se definieron las especificaciones técnicas de la HMI considerando tanto los requisitos normativos como las condiciones reales del entorno rural. En la tercera fase, se implementó la interfaz utilizando Node-RED como entorno de desarrollo, sensores DHT22 para la medición de variables, microcontroladores ESP32 como nodos de adquisición y el protocolo MQTT para la comunicación de datos. Esto permitió la recolección, visualización y almacenamiento de información en tiempo real.

El sistema desarrollado permite acceso local y remoto, registro de lotes de datos, generación de alertas y exportación de la información recolectada. Su validación en condiciones controladas evidenció estabilidad, precisión, facilidad de uso y escalabilidad. Se concluye que esta herramienta contribuye significativamente a la eficiencia y trazabilidad del proceso, promoviendo la adopción de tecnologías accesibles en zonas rurales y fortaleciendo las capacidades tecnológicas de los pequeños cacaoteros mediante el uso de Node-RED, sensores

DHT22, microcontroladores ESP32 y el protocolo MQTT, lo cual permitió la adquisición, visualización y almacenamiento de datos en tiempo real.

Palabras clave: HMI, secado, Raspberry, ISA, monitoreo.

Abstract

This undergraduate thesis presents the design and implementation of a Human-Machine Interface (HMI) developed on a Raspberry Pi 5, aimed at monitoring and controlling the cocoa drying process using a solar tunnel dryer, intended to benefit small rural producers. The project was guided by the ANSI/ISA-101.01-2015 standard, which provides structured guidelines for the efficient and standardized design of interfaces in industrial automation systems.

The methodology was structured into three phases. In the first phase, the critical variables of the drying process were identified: internal temperature and relative humidity within the drying structure, external ambient temperature, and product exposure time. In the second phase, the technical specifications for the HMI were defined, considering both the normative requirements and the real-world rural context. Finally, in the third phase, the interface was built and implemented using Node-RED, DHT22 sensors, ESP32 microcontrollers, and the MQTT communication protocol, enabling real-time data acquisition, visualization, and storage.

The developed HMI allows for both local and remote access, lot registration, alarm generation, and data export. The system was successfully validated under controlled conditions, proving to be stable, accurate, user-friendly, and scalable. It is concluded that the proposed technological solution meets the defined objectives and serves as an effective tool to improve the traceability and efficiency of the cocoa drying process, promoting the use of low-cost technologies adapted to rural contexts.

Keywords: HMI, cocoa drying, Raspberry Pi, ISA 101, monitoring.

Tabla de Contenido

Resumen.....	4
Abstract.....	6
Introducción	12
Justificación	14
Objetivos.....	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
Marco Teórico.....	16
Norma de Referencia HMI.....	16
Conceptos y Recursos	19
Proceso de Secado del Cacao.....	22
Metodología	25
Resultados y Análisis de Resultados.....	27
Identificación de las Variables de Monitoreo y Control.....	27
Determinación de las Especificaciones Técnicas para la Construcción de la HMI	28
Desarrollo e Omplementación de la HMI.....	29
Descripción de los recursos tecnológicos	38
Especificaciones Técnicas Destacadas	38
Funciones Clave en el Proyecto	39
Protocolo de comunicación: MQTT	39
Características clave.....	40
Implementación.....	41
Sensores de Temperatura y Humedad: DHT22	41
Especificaciones técnicas.....	42
Microcontroladores auxiliares: ESP32 con módulo Wi-Fi.....	42

Especificaciones Combinadas y funciones	43
Entorno de Desarrollo Visual: Node-RED	43
Base de Datos Local: SQLite	44
Red Privada Virtual y Acceso Remoto: ZeroTier.....	44
Actuadores: Relés Controlados desde GPIO de ESP32.....	45
Conclusión Técnica.....	45
Etapas de diseño e implementación de la interfaz HMI bajo la norma ISA 101	46
Filosofía HMI.....	47
Guía de estilo	47
Caja de herramientas.....	47
Diseño del sistema HMI.....	48
Implementación.....	48
Verificación y prueba.....	48
Operación y mantenimiento	49
Conclusiones	52
Recomendaciones	54
Referencias Bibliográficas	55
Apéndices.....	58

Listado de Tablas

Tabla 1	Sustento de cumplimiento de la norma ISA 101 en el diseño de la HMI.....	35
Tabla 2	Resumen de las etapas del ciclo de vida HMI	49

Listado de Figuras

Figura 1 Ciclo de Vida.....	17
Figura 2 Estructura básica del uso de Node-RED	19
Figura 3 Diagrama de estructura de flujos de datos en Node-RED.....	21
Figura 4 Raspberry Pi 5	22
Figura 5 Secador tipo marquesina	23
Figura 6 Formulario de login y contraseña	29
Figura 7 Menú de creación y edición de usuarios	30
Figura 8 Menú principal	30
Figura 9 Submenú mesas	31
Figura 10 Ingreso de número de lote o identificación del producto	31
Figura 11 Funciones de búsqueda de datos	32
Figura 12 Botones de descarga archivo CSV datos guardados	32
Figura 13 Flujo alertas correo electrónico	33
Figura 14 Control actuadores ventilador y extractor	33
Figura 15 Figura interfaz visualizada en PC.....	34
Figura 16 Raspbrry Pi 5 con SP32 reales con sensores DTH22 operativos	35
Figura 17 Esquema básico de MQTT	39
Figura 18 Sensor DTH22.....	41
Figura 19 Microcontrolador ESP32.....	42

Lista de Apéndices

Apéndice A Manual de operación HMI	58
Apéndice B Diagramas de flujo	63

Introducción

Según cifras de FEDECACAO (2024), el departamento de Santander lidera la producción de cacao en Colombia, aportando aproximadamente el 41 % del total nacional. Este protagonismo en el panorama cacaotero del país genera la necesidad de fortalecer las capacidades tecnológicas del sector, especialmente en los procesos críticos de la cadena productiva. Entre ellos, el secado del grano representa una etapa determinante para garantizar la calidad final del producto, influyendo directamente en su aroma, sabor y valor comercial.

En este contexto, el desarrollo de soluciones tecnológicas adaptadas a las realidades de los pequeños productores resulta estratégico. La implementación de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI), basada en la norma ANSI/ISA-101.01-2015, permite mejorar el monitoreo y control del secado tipo marquesina. Dicha norma establece directrices para el diseño coherente y estructurado de interfaces gráficas industriales, promoviendo una operación más segura, clara y eficiente. Su aplicación facilita la reducción de errores humanos, optimiza la toma de decisiones y mejora la experiencia del operador, al ofrecer distintos niveles de visualización —desde una perspectiva general hasta detalles específicos— adaptados al contexto de producción familiar.

El objetivo principal de este trabajo es Implementar una Human Machine Interface (HMI) con una Raspberry Pi 5, para el monitoreo y control de un equipo de secado de cacao tipo marquesina, mediante la aplicación de la norma ISA 101, Para el logro de dicho objetivo, se empleó una metodología de investigación de tipo cuantitativo y experimental, estructurada en tres fases:

Identificación de las variables de monitoreo y control que deben ser involucradas en un sistema monitoreo y control de secado de cacao tipo marquesina.

Determinación de las especificaciones técnicas para la construcción de la HMI, mediante el estudio de la norma ISA 101, factibles de ser aplicadas en el equipo de secado de cacao tipo marquesina.

Desarrollo de una HMI mediante una Raspberry Pi 5, para el sistema de secado de cacao tipo marquesina.

Utilizar una Raspberry Pi 5 como plataforma para una HMI, diseñada bajo los lineamientos de la norma ISA-101, permite no solo aprovechar la accesibilidad y eficiencia de dicha norma, sino también contar con una capacidad de procesamiento adecuada para tareas de control en tiempo real. Además, facilita la construcción de interfaces visuales que sean intuitivas, portables y adaptadas a las necesidades del productor de cacao.

Justificación

De acuerdo con los datos proporcionados por la cámara de comercio de Bucaramanga del año 2022, en el informe Actividad Empresarial del Sector Cacaotero en Santander, en Colombia existen 229. 974 hectáreas sembradas, siendo Santander el principal productor con 35.775 toneladas. Por lo tanto, este trabajo apoya el reto de seguir innovando, apostándole a mantener y mejorar la calidad del producto y la competitividad del mercado.

Se estima que 18 mil familias en Santander viven del Cacao, según cifras de Fedecacao en 2022, por lo tanto, este proyecto, al realizar seguimiento y monitoreo a variables críticas en el proceso de secado de cacao, se convierte en una opción viable para estandarizar dicho proceso, pues al tener monitoreadas las variables relacionadas con la calidad, el sabor y aroma, se disminuyen pérdidas y se mejora la calidad del producto impactando los ingresos de los productores cacaoteros.

La implementación de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI), basada en la norma ANSI/ISA-101.01-2015, permite una operación más segura, clara y eficiente. Su aplicación facilita la reducción de errores humanos, optimiza la toma de decisiones y mejora la experiencia del operador, al ofrecer distintos niveles de visualización, adaptándose perfectamente a las necesidades del campo y la transferencia de tecnologías para mejorar procesos productivos.

Este proyecto se alinea con el perfil del egresado de Ingeniería Electrónica, porque no solo entiende las leyes que rigen los fenómenos físicos que sirven de fundamento a la Ingeniería Electrónica, sino que comprende los fenómenos sociales y la dinámica de cambio que caracteriza al mundo cambiante, a la vez que contribuye al desarrollo social y económico de la región y el país.

Objetivos

Objetivo General

Implementar una Human Machine Interface (HMI) con una Raspberry Pi 5, para el monitoreo y control de un equipo de secado de cacao tipo marquesina, mediante la aplicación de la norma ISA 101.

Objetivos Específicos

Identificar las variables de monitoreo y control que deben ser involucradas en un sistema monitoreo y control de secado de cacao tipo marquesina.

Determinar las especificaciones técnicas para la construcción de la HMI, mediante el estudio de la norma ISA 101, factibles de ser aplicadas en el equipo de secado de cacao tipo marquesina.

Desarrollar la HMI mediante una Raspberry Pi 5, para el sistema de secado de cacao tipo marquesina.

Marco Teórico

Norma de Referencia HMI

Una HMI (Interfaz hombre-Máquina), es la colección de hardware y software utilizado por el operador y otros usuarios para monitorear e interactuar con el sistema de control y con el proceso a través del del sistema de control (ANSI/ISA-101, 2015). Por su parte la serie de normas e informes técnicos ISA-101 proporciona una guía fiable para el diseño, la implementación, la operación y el mantenimiento de interfaces hombre-máquina (HMI) en sistemas modernos de automatización de procesos. Centradas en la mejora de la seguridad, la calidad, la productividad y la fiabilidad, estas normas guían a los profesionales en la creación de HMI intuitivas y de alto rendimiento que optimizan el control.

Las normas ISA (Sociedad Internacional de Automatización) se crearon con el objetivo de dar uniformidad en el campo de la instrumentación y la automatización industrial. Estos estándares, que incluyen aspectos de seguridad, establecen requisitos para la instalación, el mantenimiento y la operabilidad de sistemas como alarmas de intrusión y dispositivos de seguridad electrónicos. Aunque no son tan conocidas a nivel global como otras normas ANSI, se enfocan en proporcionar directrices claras y detalladas para garantizar la efectividad y seguridad de los sistemas. En particular, la norma ISA-101 tiene como objetivo abordar cuatro aspectos clave:

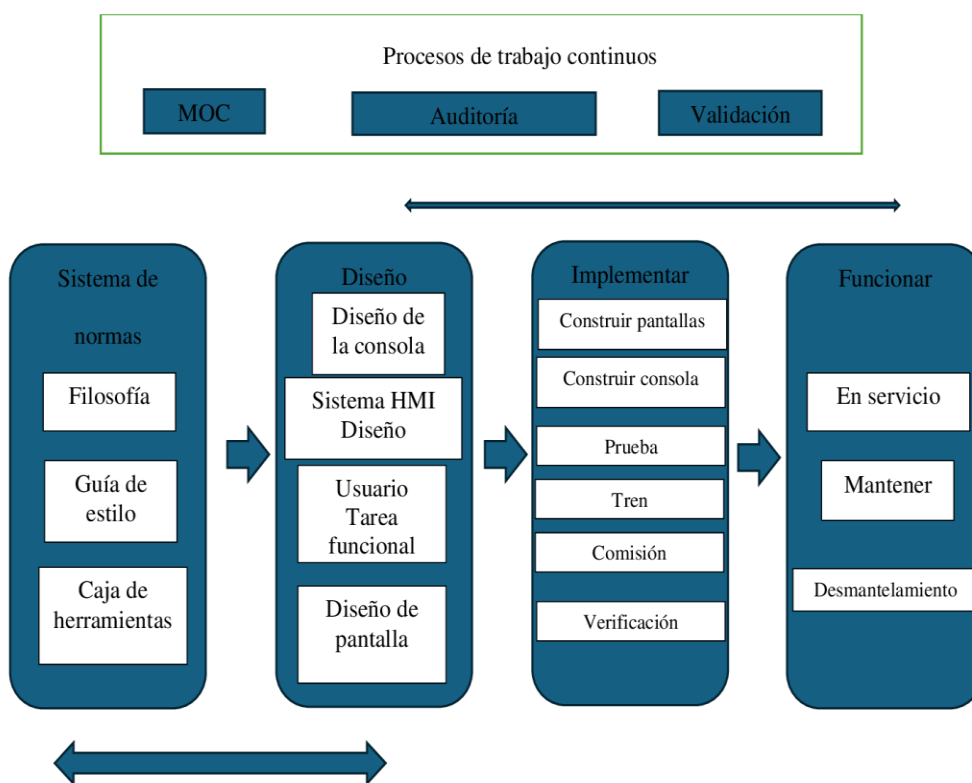
1. La filosofía HMI.
2. Diseño de la HMI.
3. Implementación de la HMI.
4. Operación y Mantenimiento de la HMI.

Usar esta norma como guía permite al creador de la HMI, tener orientación para diseñar, construir, operar y mantener una HMI, logrando un sistema de control de procesos más seguro y eficiente.

Estas fases se desarrollan mediante un modelo llamado ciclo de vida, como el que se observa en la Figura 1.

Figura 1

Ciclo de Vida



Fuente. Autor, adaptado de ANSI/ISA-101 (2015)

Algunos de los logros o beneficios que se asocian con la implementación de esta norma son:

Mejora de la confiabilidad de los sistemas de alarma: La norma ayuda a garantizar que los sistemas de alarmas instalados sean más confiables, reduciendo falsos positivos y fallos en la detección de intrusiones.

Establecimiento de estándares de instalación: Define claramente los procedimientos de instalación, lo que asegura que los sistemas de seguridad sean colocados de manera correcta y efectiva, minimizando los errores humanos y aumentando la eficiencia.

Mantenimiento regular y adecuado: La norma promueve la importancia del mantenimiento periódico, lo cual ayuda a prolongar la vida útil de los sistemas y asegurar su funcionamiento correcto a largo plazo.

Mejora de la interoperabilidad: Al seguir los estándares establecidos por la norma, los sistemas de alarmas pueden ser más fácilmente integrados con otros sistemas de seguridad y tecnología existente.

Cumplimiento con normativas locales e internacionales: Al cumplir con esta norma, las empresas pueden asegurarse de que están cumpliendo con las normativas de seguridad locales, estatales y nacionales, lo que puede ser crucial en términos legales y de seguros.

Aumento de la confianza del cliente: Los clientes que eligen un sistema certificado por ANSI/SIA 101 pueden estar más tranquilos al saber que el sistema cumple con altos estándares de calidad y seguridad.

Reducción de riesgos: La norma ayuda a minimizar los riesgos de intrusión o mal funcionamiento, lo cual es crucial para la protección de propiedades y personas.

Este tipo de normativas son fundamentales para garantizar que los sistemas de seguridad electrónicos sean tanto efectivos como confiables (Lehmann, G., & Wilkins, M 2015), lo que es esencial en un mundo cada vez más dependiente de la tecnología. Esta norma es utilizada

ampliamente en sistemas de control de acceso, sistemas de videovigilancia, Instalaciones residenciales y comerciales, sistemas de comunicación de emergencia, entre otros.

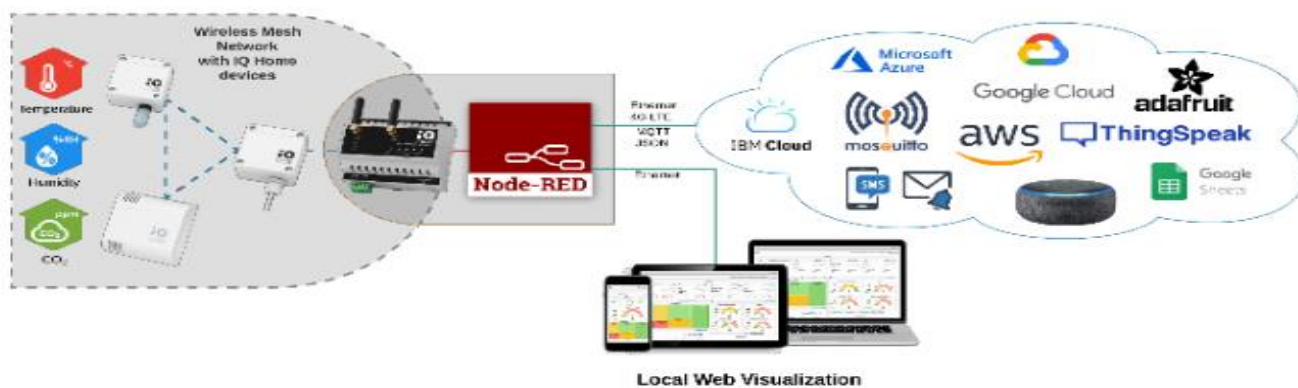
Conceptos y Recursos

A continuación, es importante detallar algunos términos utilizados en el proyecto, como lo son Node-RED y la Raspberry Pi 5.

Node-RED es una plataforma de código abierto, para programar de forma visual, que permite crear aplicaciones que recopilen, transformen y visualicen datos, mediante flujos. Es un modelo basado en eventos y sin bloqueos. Por eso lo hace ideal para ejecutarse en hardware de bajo costo como la Raspberry Pi. (Contributors, s.f.). El enfoque de tiempo real asegura una respuesta rápida y precisa, por otra parte, ofrece nuevas perspectivas en el campo de la automatización. La Figura 2 muestra la estructura básica del uso de NODE_RED.

Figura 2

Estructura básica del uso de Node-RED



Fuente. Node-RED (2025)

Node-RED también puede ser utilizada como alternativa de bajo costo en sistemas de supervisión, control y adquisición de datos SCADA, o como complemento de este, permitiendo un flujo rápido de datos (Nitulescu, 2020).

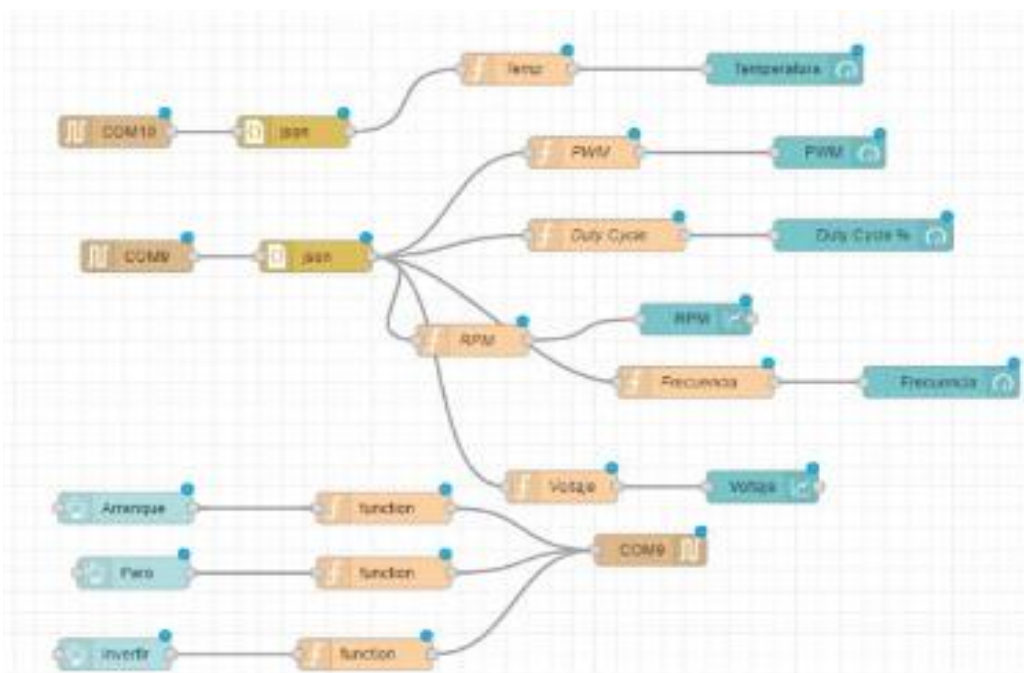
Fue diseñada por el equipo de IBM Emerging Technology Services pero ahora hace parte de la fundación OpenJS. Se basa en edición de flujos en navegador y estos flujos a su vez se interconectan a través de una gran cantidad de nodos de la paleta. Se pueden crear funciones con código JavaScript. Por su parte, JavaScript es un lenguaje de programación interpretado, basado en texto y de alto nivel, utilizado principalmente para crear y controlar el comportamiento dinámico en las páginas web. A través de su integración con HTML y CSS, JavaScript permite la implementación de funcionalidades interactivas, como la validación de formularios, la creación de efectos visuales y la manipulación de contenido de manera dinámica. Su ejecución ocurre en el navegador del cliente, lo que lo convierte en una herramienta fundamental para el desarrollo de aplicaciones web modernas. Además, JavaScript es un lenguaje multiparadigma, que soporta la programación orientada a objetos, la programación funcional y la programación.

Node-Red, está desarrollado sobre Node.js, que es un entorno de ejecución de JavaScript del lado del servidor, basado en el motor de JavaScript V8 de Google Chrome. Fue diseñado para construir aplicaciones de red escalables y de alto rendimiento que permite flujos de datos complejos mediante la conexión de nodos y la definición de lógica de procesamiento (Nieblas et al.,2023). A diferencia de los entornos tradicionales que utilizan un modelo de ejecución basado en hilos (threads), Node.js utiliza un modelo basado en eventos y un solo hilo, lo que le permite manejar múltiples conexiones simultáneamente de manera eficiente.

Otra característica importante de Node-RED, es que los flujos creados se pueden almacenar mediante JSON, para compartir fácilmente. En la Figura 3 se puede observar un diagrama de estructura de flujos de datos en Node.RED.

Figura 3

Diagrama de estructura de flujos de datos en Node-RED



Fuente. (Nieblas et al., 2023)

Otra herramienta importante utilizada en el proyecto es la minicomputadora Raspberry PI 5, la cual posee 16 GB RAM, construido con el controlador E/S RP1, diseñado internamente por Raspberry Pi. Cuenta con el procesador Broadcom BCM2712 de cuatro núcleos Arm Cortex A76 a 2.4 Ghz. Lo que la hace la minicomputadora más rápida de Raspberry hasta el momento. En la Figura 4

Raspberry Pi 5

se puede ver la apariencia física.

Figura 4*Raspberry Pi 5*

Fuente. Tomado de (Raspberry, 2025)

Es esta minicomputadora se instala el Node-RED y se corren los flujos diseñados para la interfaz teniendo en cuenta criterios expuestos en el documento de referencia ANSI/ISA -101.

Usar esta norma como guía permite al creador de la HMI, tener orientación para diseñar, construir, operar y mantener una HMI. Logrando un sistema de control de procesos más seguro y eficiente.

Estas fases se desarrollan mediante un modelo llamado ciclo de vida, como el que se observaba inicial en la Figura 1.

Proceso de Secado del Cacao

Un secado adecuado del cacao debe lograr una humedad entre el 7 y 7.5 % para ser considerado corriente o premium respectivamente. (ICONTEC, 2021). Este proceso puede realizarse de forma natural o artificial. Es importante, un buen beneficio del cacao ya que la fermentación y el secado, para alcanzar el aroma y sabor adecuados. (Universidad Politécnica

Salesiana, 2014). El secado debe hacerse lenta y gradualmente. (Jiménez, 2000). Existen dos formas de secado: natural y artificial.

Secado Natural: consiste en la exposición directa del cacao a la radiación solar, aprovechando las condiciones ambientales para reducir su contenido de humedad.

Secado artificial: se clasifica en dos tipos: directo e indirecto. En el método directo, el grano se expone a un flujo de aire caliente, que en este caso actúa como el agente de secado. Para este trabajo, mediante la instalación de ventiladores, extractores y elementos calefactores que acondicionan el aire, se implementa un sistema de secado directo utilizando un secador tipo marquesina, como se ilustra en la figura 5.

Figura 5

Secador tipo marquesina



Fuente. Tomado de (Estrada, J. M. 2021)

Sobre las condiciones ambientales (Beckett, 2009), describe que, al evaluar el sabor de granos de cacao secados por diferentes métodos, es decir secado al sol, soplado al aire, secado a la sombra y secado en el horno se concluyó que las muestras con secado al sol puntuaron más alto desarrollo de sabor. Otros autores, han concluido que el calor excesivo y secado rápido pueden no permitir una pérdida adecuada de ácidos volátiles como por ejemplo el ácido acético y

por tanto tienen un efecto perjudicial sobre la calidad del grano llegando a un chocolate con menos notas agradables (Cardona, M., 2016).

Las variables seleccionadas obedecen a la revisión bibliográfica realizada, donde diferentes autores realizaron curvas comparativas entre datos teóricos y condiciones ambientales, basados en la difusividad efectiva y estudios de curvas de deshidratación aplicando la ecuación de Arrhenius, estas variables son consideradas importantes en el proceso. La operación de secado permite influir en su calidad, especialmente en la valorización postcosecha del cacao, dado que proporciona los niveles óptimos de humedad, con lo cual se logra estabilizar el producto microbiológicamente, permite retener compuestos fenólicos que proveen propiedades funcionales, permiten disminuir la acidez de los granos, mediante la liberación de ácidos orgánicos como ácido láctico, cítrico y acético (Chica Barco, V., 2022).

Metodología

El presente trabajo tipo proyecto aplicado emplea como metodología, los procesos de investigación aplicada de corte experimental cuyo propósito es desarrollar una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) para el monitoreo y control de un sistema de secado de cacao tipo marquesina, mediante el uso de tecnologías electrónicas accesibles y bajo los lineamientos de la norma ANSI/ISA-101.01 (2015).

La metodología adoptada se estructuró en tres fases, cada una de las cuales responde directamente a los objetivos específicos propuestos en el proyecto. Las fases se detallan a continuación:

Fase 1. Identificación de las variables de monitoreo y control: en esta etapa se realizó un proceso de revisión documental orientado a comprender las características del secado del cacao y determinar las variables relevantes a controlar. Se consultaron normas técnicas (como la NTC 1252:2021), artículos académicos, reportes técnicos y literatura especializada. Este análisis permitió establecer que las variables críticas para un secado eficiente son la temperatura ambiental externa, así como la temperatura ambiente, la humedad relativa dentro del secador y la duración de este.

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta las condiciones ambientales del departamento de Santander (Observatorio de Responsabilidad Social Universitaria- Universidad Santo Tomás, 2022) y las prácticas comunes utilizadas por los productores locales, asimismo, experiencias exitosas con proyectos relacionados en temas de cacao y expertos en el área del estudio. Esta

contextualización permitió identificar las necesidades reales del sector y orientar el diseño funcional del sistema de monitoreo y control.

Fase 2. Determinación de las especificaciones técnicas para la construcción de la HMI. A partir de las variables identificadas en la fase anterior, se procedió a establecer los requisitos técnicos necesarios para el diseño y desarrollo de la HMI. Esta etapa se fundamentó en el estudio de la norma ANSI/ISA-101.01 (2015), la cual proporciona directrices para el diseño eficiente, seguro y estandarizado de interfaces gráficas en sistemas de automatización industrial.

Sin embargo, el diseño técnico no se limitó a una interpretación normativa. En este proceso también se consideraron de manera explícita las características sociales, culturales y operativas del usuario final, es decir, de los productores de cacao de la región. Se reconoció que, en muchos casos, se trata de personas con bajo nivel de escolaridad formal, cuyas jornadas laborales son extensas y cuyo contacto con dispositivos electrónicos puede ser limitado. Asimismo, se tuvo en cuenta que la manipulación del sistema sería realizada con manos rudas, propias del trabajo físico en el campo, lo cual implicó adoptar criterios de usabilidad, asimismo, se toman decisiones frente a criterios tecnológicos como costo-beneficio, la accesibilidad, la autonomía del usuario y la sostenibilidad del sistema.

Fase 3. Desarrollo e implementación de la HMI. En la fase final se procedió a la implementación del sistema propuesto partiendo de la estructuración jerárquica del sistema hasta llegar a conseguir un sistema funcional, robusto y adaptado a las condiciones del entorno del estudio.

Resultados y Análisis de Resultados

Los resultados del presente proyecto se presentan a continuación estructurados de acuerdo con las tres fases metodológicas descritas previamente, permitiendo evidenciar el cumplimiento de los objetivos específicos y la aplicabilidad práctica de la solución implementada.

Identificación de las Variables de Monitoreo y Control

Como resultado de la revisión documental y del análisis de condiciones reales del entorno productivo del cacao en la región de Santander, se establecieron como variables críticas a monitorear y controlar en el proceso de secado:

Temperatura ambiente externa (alrededor de la marquesina), medida fuera de la marquesina, permite conocer las condiciones climáticas del entorno y ajustar estrategias de ventilación o cierre del secador.

Otras de las variables a tener en cuenta son la temperatura ambiente y humedad relativa interna en tres zonas diferentes del secador (una por cada mesa de secado), tiempo de exposición del producto a dichas condiciones.

Temperatura interna por mesa y/o lote: Se realiza una medición independiente en cada una de las tres mesas de secado del estudio. Esta información es clave para asegurar que el producto esté expuesto a un ambiente térmico adecuado y uniforme.

Humedad relativa interna por zona: También medida individualmente en cada mesa es una variable determinante para la eficiencia del proceso de deshidratación del grano. Un factor crítico en el proceso de secado es la humedad de aire, ya que a medida que se elimina agua de los

sólidos, el aire va aumentando el contenido de humedad, sin embargo, no es recomendable remover grandes cantidades de vapor de agua del aire, ya que el aire seco deshidrata la superficie de los granos de tal forma que expone la superficie a quemaduras Barbosa & Vega (2000).

Tiempo de exposición (histórico por lote): Se lleva un registro continuo que permite analizar cuánto tiempo ha estado el producto bajo determinadas condiciones ambientales.

Determinación de las Especificaciones Técnicas para la Construcción de la HMI

A partir de las variables definidas, se establecieron los siguientes requisitos técnicos para la HMI, en conformidad con la norma ANSI/ISA-101.01 (2015):

Desde el punto de vista tecnológico, se eligieron los siguientes recursos:

Raspberry Pi 5, como plataforma central, con excelente desempeño y bajo consumo. Es ideal para zonas rurales sin infraestructura robusta, manteniendo capacidad suficiente para tareas de control en tiempo real y visualización.

Node-RED, para el desarrollo de la lógica de control y la interfaz gráfica. Node-RED permite construir flujos de trabajo visuales, lo que acelera el desarrollo, mejora el mantenimiento y es una herramienta ideal para sistemas distribuidos y modulares como una marquesina de secado.

Sensores DHT22, programados en microcontrolador SP32 con Arduino IDE, para la medición de temperatura y humedad relativa. Sensores económicos y precisos ideales para variables críticas del secado (temperatura y humedad). Usar SP32 permite una lectura confiable y personalizada, sin depender de sistemas complejos o costosos.

SQLite, como base de datos embebida para el almacenamiento local de datos. Esta base de datos no requiere servidor, lo que la hace ideal para entornos rurales. Su uso asegura almacenamiento persistente, incluso sin conexión a internet

ZeroTier, como solución de conectividad remota segura, brinda una VPN ligera, permitiendo acceso remoto a los datos o la HMI desde otras ubicaciones sin necesidad de infraestructura de red compleja o costosa

Router local, para habilitar el acceso dentro de una red LAN sin depender de internet, ya que el cultivo del cacao se da en topografías peculiares, el uso de Router local permite el funcionamiento autónomo y local del sistema, garantizando confiabilidad incluso en las circunstancias antes planteadas.

Estas decisiones se basan en la norma del estudio buscando garantizar la viabilidad técnica, económica y operativa del sistema en ambientes rurales.

Desarrollo e Omplementación de la HMI

La HMI fue implementada exitosamente en la Raspberry Pi 5 utilizando Node-RED como plataforma de desarrollo y configuración, la cual se programó para iniciar automáticamente con el sistema operativo, asegurando la disponibilidad inmediata de la interfaz al encender el dispositivo.

Para su uso se realizaron las siguientes implementaciones funcionales:

Interfaz de inicio con acceso mediante validación de usuario. Como se puede observar en la figura 6.

Figura 6

Formulario de login y contraseña

Iniciar Sesión

Email *

Contraseña *

INGRESAR

Fuente. Node-RED (2025)

Previamente se autoriza el usuario que es un correo electrónico y su respectiva contraseña para validar o rechazar el ingreso del usuario, como se muestra en la figura 7.

Figura 7

Menú de creación y edición de usuarios

Usuarios

Crear/Editar Usuario

Email Contraseña

Permisos Activo

Lista Usuarios

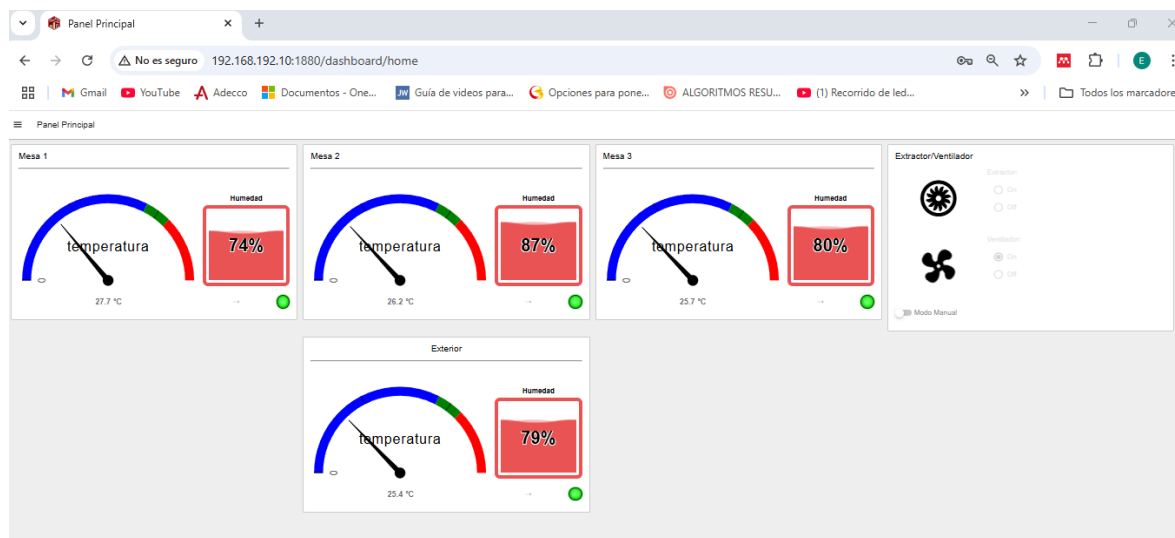
Email	Permisos	Activo	Eliminar
rafael.ortegaal@gmail.com	operario	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="✖"/>
operario1@mail.com	operario	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="✖"/>
edwinduritec@gmail.com	super	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="✖"/>

Nota. Elaboración propia a partir de la herramienta Node-RED (2025). *Fuente.* Autor

Menú principal que muestra el estado general de las tres mesas de secado. Como se puede observar en la figura 8.

Figura 8

Menú principal



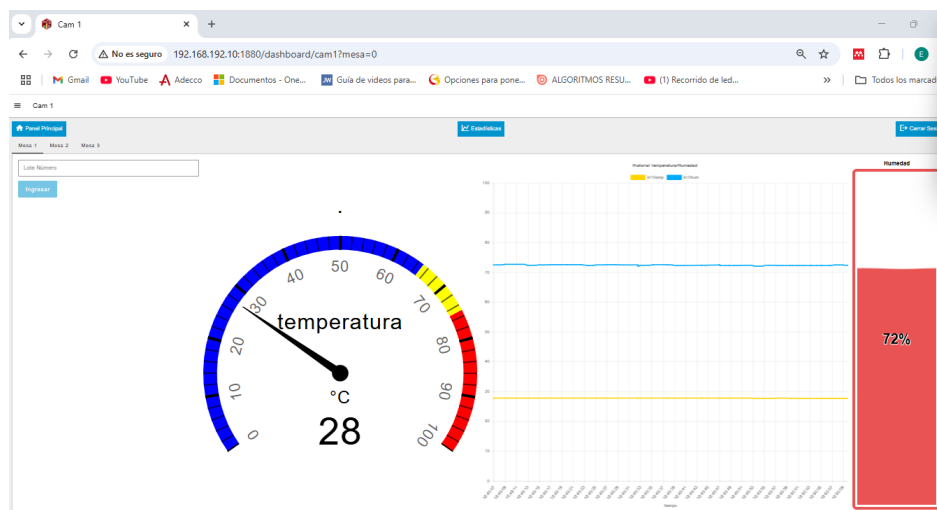
Nota. Elaboración propia a partir de la herramienta Node-RED (2025). *Fuente.* Autor

Submenús por mesa, con gráficos en tiempo real y tablas de datos sensados cada minuto.

Como se puede observar en la figura 9.

Figura 9

Submenú mesas



Nota. Elaboración propia a partir de la herramienta Node-RED (2025). *Fuente.* Autor

Registro manual del número de lote para trazabilidad del producto. Como se puede observar en la figura 10.

Figura 10

Ingreso de número de lote o identificación del producto

Panel Principal

Mesa 1 Mesa 2 Mesa 3

Lote Número

Ingresar

Nota. Elaboración propia a partir de la herramienta Node-RED (2025). *Fuente.* Autor

Módulo de estadísticas con filtros por lote o por rango de fechas. Como se puede observar en la figura 11.

Figura 11

Funciones de búsqueda de datos

≡ Estadísticas

Seleccione mesa:

Mesa 1

Mesa 2

Mesa 3

Ingrese num Lote

Buscar Por Lote

Desde Fecha: dd/mm/aaaa

Desde Hora: --:--

Hasta Fecha: dd/mm/aaaa

Hasta Hora: --:--

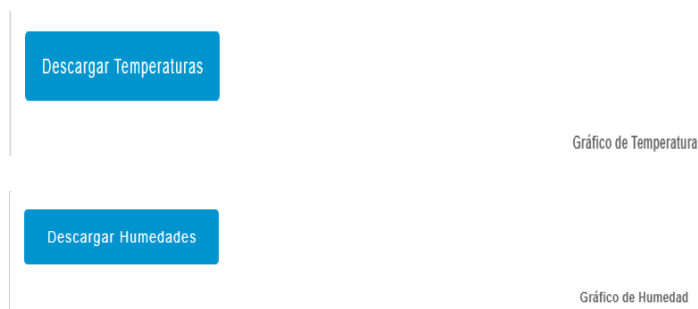
Buscar Por Fecha

Nota. Elaboración propia a partir de la herramienta Node-RED (2025). *Fuente.* Autor

Opción de descarga de datos en archivo CSV. Como se puede observar en la figura 12.

Figura 12

Botones de descarga archivo CSV datos guardados

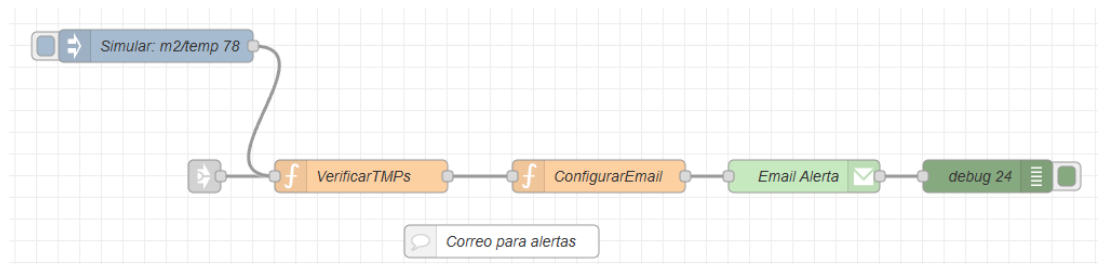


Nota. Elaboración propia a partir de la herramienta Node-RED (2025). *Fuente.* Autor

Integración de alarmas visuales y envío de notificaciones por correo electrónico cuando los valores exceden los rangos definidos. Como se puede observar en la figura 13.

Figura 13

Flujo alertas correo electrónico

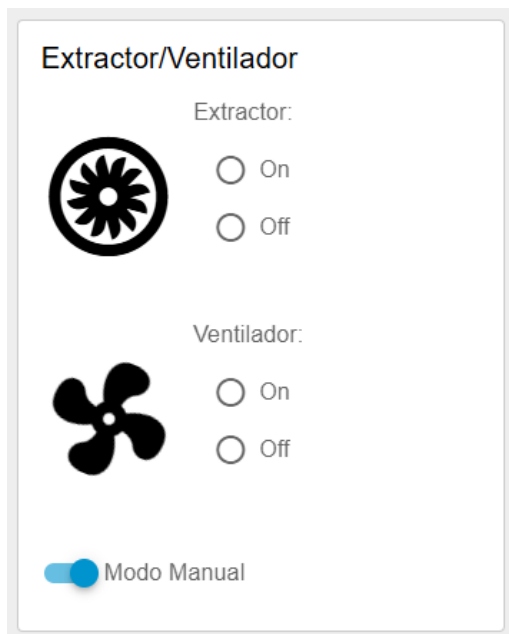


Nota. Elaboración propia a partir de la herramienta Node-RED (2025). *Fuente.* Autor

Control manual de actuadores (ventiladores y extractores) desde la misma interfaz. Como se puede observar en la figura 14.

Figura 14

Control actuadores ventilador y extractor

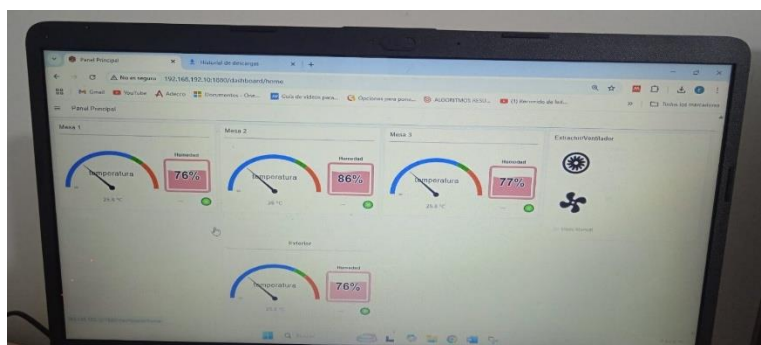


Nota. Elaboración propia a partir de la herramienta Node-RED (2025). *Fuente.* Autor

En cuanto a la conectividad, el sistema permite el acceso: A) De forma local, mediante teclado, pantalla y mouse conectados directamente a la Raspberry Pi. B) A través de red local (LAN), mediante un router que facilita el acceso desde dispositivos como PCs o tablets conectados a la misma red. C) De forma remota, mediante ZeroTier, que habilita el ingreso desde cualquier dispositivo con conexión a internet, previa autorización del usuario. D) Las pruebas funcionales se realizaron en un entorno simulado y mostraron resultados muy satisfactorios: Como se puede observar en las figuras 15 y 16.

Figura 15

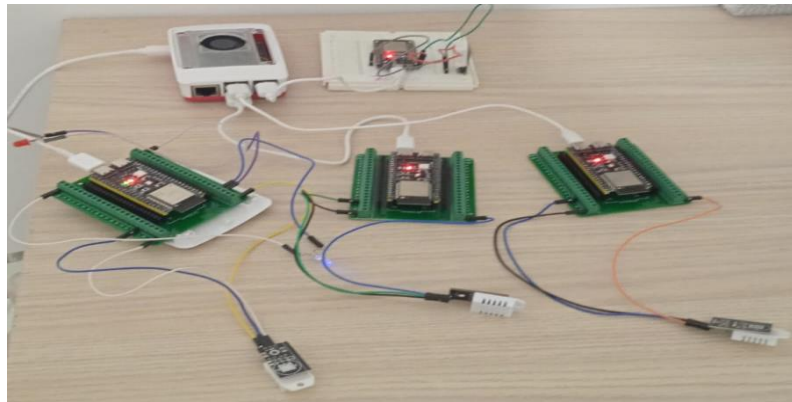
Figura interfaz visualizada en PC



Nota. Elaboración propia a partir de la herramienta Node-RED (2025). *Fuente.* Autor

Figura 16

Raspbrry Pi 5 con SP32 reales con sensores DTH22 operativos



Fuente. Autor

Así mismo el sistema respondió adecuadamente a los cambios en las variables físicas. La lectura de sensores fue estable y precisa. Las alertas visuales y las notificaciones electrónicas se activaron según lo previsto. La interfaz fue accesible desde diferentes dispositivos. El almacenamiento de datos y la exportación en formato CSV funcionaron correctamente. La operación manual de los actuadores desde la HMI fue efectiva, como se explica en el video desarrollado en el resultado de la investigación <https://youtu.be/mBNxqvOXggE>.

A continuación, se presenta la tabla 1 de sustento para mostrar como se aplicaron los lineamientos de la norma ISA 101 en el diseño de la HMI:

Tabla 1

Sustento de cumplimiento de la norma ISA 101 en el diseño de la HMI

Aspecto de la norma ISA-101	Lineamiento según la norma	Aplicación en el proyecto	Evidencia en el documento
Filosofía HMI	Definir principios rectores que aseguren	Enfoque en accesibilidad para	Etapas de diseño e implementación de la

	claridad, seguridad y eficiencia de la interfaz.	usuarios rurales: simplicidad, robustez, monitoreo en tiempo real y trazabilidad por lotes.	HMI usando como referencia la norma ISA-101.
Guía de estilo	Establecer lineamientos visuales consistentes (colores, tipografía, jerarquía).	Uso de colores verde, amarillo, rojo para estados; botones grandes y textos legibles; navegación jerárquica clara.	Figuras 6 a 10.
Caja de herramientas	Seleccionar recursos tecnológicos adecuados al contexto y objetivos.	Raspberry Pi 5, Node-RED, ESP32, sensores DHT22, MQTT, SQLite, ZeroTier.	Descripción de los recursos tecnológicos.
Diseño del sistema HMI	Definir arquitectura cliente-servidor, modular y escalable.	Arquitectura distribuida: sensores publican vía MQTT, Raspberry centraliza control y visualización.	Figura 17 y descripción de MQTT.

Diseño de pantallas	Jerarquía clara de pantallas: general a detalle.	Pantalla de inicio, menú principal, submenús por mesa, panel de control de actuadores, estadísticas y exportación.	Figuras 6 a 14.
Implementación	Desarrollo de flujos de control y visualización con pruebas funcionales.	Node-RED configurado para iniciar automáticamente; control manual, alarmas visuales y por correo.	Apéndice B: Diagramas de flujo.
Verificación y prueba	Validar funcionalidad, estabilidad y usabilidad.	Pruebas en entorno simulado: precisión de sensores, activación de alarmas, exportación CSV, acceso remoto.	Resultados y análisis.
Operación y mantenimiento	Proveer manual de usuario y plan de mantenimiento.	Manual de operación (Apéndice A); recomendaciones de	Apéndice A.

limpieza de sensores,
respaldo de datos y
actualizaciones.

Fuente. Autor

Descripción de los recursos tecnológicos

El sistema desarrollado integra diversos recursos tecnológicos de hardware y software, seleccionados por su compatibilidad con entornos embebidos, su eficiencia energética, escalabilidad y adecuación al contexto rural. A continuación, se describen los principales componentes y tecnologías utilizadas en el diseño, implementación e integración del sistema de monitoreo y control del proceso de secado de cacao.

Unidad principal de procesamiento: Raspberry Pi 5. La Raspberry Pi 5 se utilizó como unidad central de procesamiento (CPU embebida), actuando como servidor de la HMI y nodo de integración de datos sensados y comandos de control.

Especificaciones Técnicas Destacadas

CPU: Broadcom BCM2712, Quad-core ARM Cortex-A76 @ 2.4 GHz

RAM: 16 GB LPDDR4X: lo que permite ejecutar la interfaz gráfica sin retardo y procesar los datos en tiempo real sin afectar la respuesta de la interfaz y da margen de escalamiento a futuro.

Almacenamiento: MicroSD + soporte para disco NVMe vía PCIe. Para el proyecto se usa una Micro SD de 64 GB y allí se almacena el sistema operativo y se guarda los archivos generados para almacenar los datos.

Conectividad: Gigabit Ethernet, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0, USB 3.0. en el Proyecto se aprovecha la función de Wi-Fi, para conectarse a la red local.

Sistema operativo: Raspberry Pi OS 64-bit (Debian-based) ideal para proyectos técnicos. También se usa por la compatibilidad con librerías y Node-RED, estabilidad e integración con MQTT.

Puertos GPIO: 40 pines disponibles para entradas/salidas digitales. Si a futuro se quieren controlar actuadores con los 26 pines disponibles para ello.

Funciones Clave en el Proyecto

Ejecuta Node-RED como entorno de control, visualización y lógica.

Actúa como broker y cliente MQTT, gestionando la recepción de datos sensados en tiempo real.

Almacena registros históricos en base de datos local (SQLite).

Podría controlar directamente actuadores mediante puertos GPIO.

Sirve como servidor local para la HMI y permite acceso remoto (ZeroTier) o en red LAN (router).

Protocolo de comunicación: MQTT

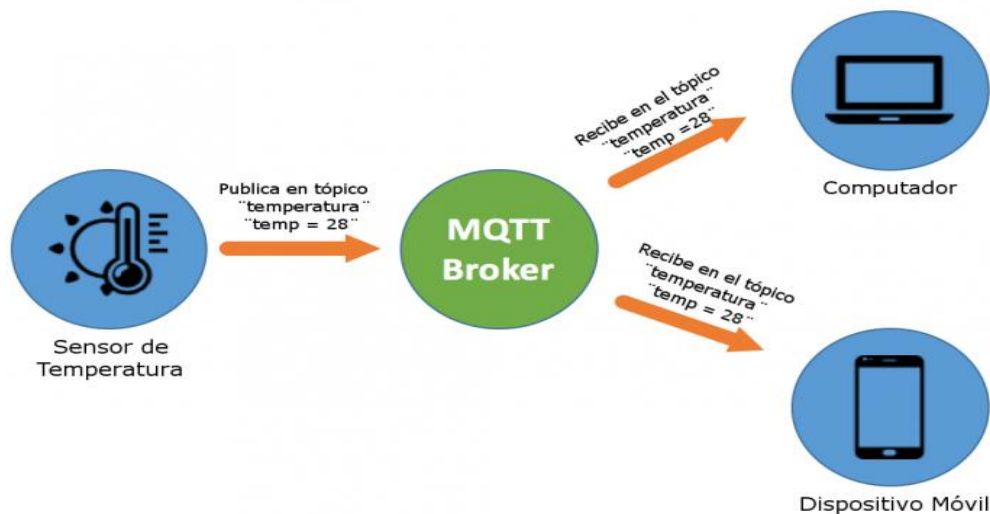
El sistema emplea MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) como protocolo de mensajería ligero para la comunicación entre sensores (vía SP32 programados con Arduino IDE) y la Raspberry Pi.

Características técnicas de MQTT: como se puede observar en la figura 17. A) Modelo de comunicación: Publicador/Suscriptor (pub/sub) B) Transporte: TCP/IP C) Ligereza: Ideal para redes con bajo ancho de banda D) Broker utilizado: Mosquitto (instalado en la Raspberry Pi)

QoS configurado: Nivel 0 (entrega al menos una vez), por eficiencia.

Figura 17

Esquema básico de MQTT



Fuente. Zorrilla, J. (2019).

MQTT es un protocolo de comunicación ligero, basado en el modelo publicador/suscriptor y operando sobre TCP/IP. Fue diseñado para redes con ancho de banda limitado, alta latencia o conexiones inestables, siendo ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) y sistemas embebidos como la Raspberry Pi.

Características clave

Modelo publicador/suscriptor:

Los dispositivos no se comunican directamente. En su lugar, un publicador envía mensajes a un “topic” y un suscriptor recibe los mensajes del topic al que está suscrito. Todo esto es gestionado por un broker MQTT (por ejemplo, Mosquitto).

Ligero:

Consume pocos recursos de red y procesamiento.

Calidad de servicio (QoS):

Soporta tres niveles de QoS para asegurar la entrega de mensajes: A) QoS 0: entrega al menos una vez, sin confirmación. B) QoS 1: entrega al menos una vez, con confirmación. C)

QoS 2: entrega exactamente una vez, con confirmación y control adicional. D) Puertos TCP estándar:

Usa por defecto el puerto 1883 para conexiones no cifradas y el puerto 8883 para conexiones seguras (TLS/SSL).

Implementación

Cada microcontrolador SP32 con sensores DHT22 publica datos de temperatura y humedad mediante tópicos MQTT, uno por sensor. La Raspberry Pi, ejecutando el broker Mosquitto, recibe y gestiona estos mensajes. Node-RED se suscribe a los tópicos para visualizar y almacenar la información.

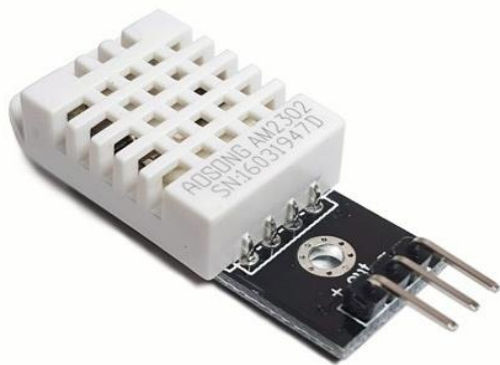
El uso de MQTT permite independencia física entre sensores y servidor, mejora la escalabilidad del sistema y reduce la complejidad del cableado, permitiendo que sensores estén distribuidos y conectados por Wi-Fi en futuras versiones.

Sensores de Temperatura y Humedad: DHT22

Los sensores DHT22 son digitales, calibrados de fábrica, con capacidad para proporcionar lecturas simultáneas de temperatura y humedad relativa. La figura 18 ilustra el sensor DTH22.

Figura 18

Sensor DTH22



Fuente. Electronics.com.bd. (s. f.)

Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas del sensor de temperatura y humedad se describen a continuación: A) Temperatura: -40 a +80 °C, precisión ± 0.5 °C, B) Humedad: 0–100 % HR, precisión ± 2 –5 % HR, D) Tiempo de respuesta: 2 s, E) Protocolo de comunicación con microcontrolador: digital de un hilo, F) Alimentación: 3.3–6 V, G) Instalación: Tres sensores ubicados dentro de la marquesina (uno por mesa). Un sensor adicional instalado externamente para temperatura ambiental exterior.

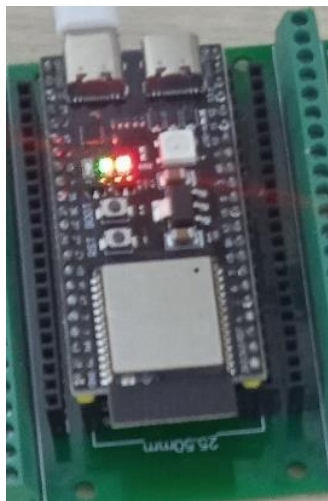
Los datos son enviados vía MQTT desde los microcontroladores SP32 a través de la red local al broker Mosquitto en la Raspberry Pi.

Microcontroladores auxiliares: ESP32 con módulo Wi-Fi.

Para gestionar los sensores, se emplearon microcontroladores ESP32 ilustrados en la figura 19, con módulos Wi-Fi, que actúan como clientes MQTT.

Figura 19

Microcontrolador ESP32



Fuente. Autor

Especificaciones Combinadas y funciones

Las características y funciones del microcontrolador se definen a continuación: A) Dual-core Tensilica LX6, hasta 240 MHz, B) Programación en Arduino IDE, C) Comunicación serial entre DHT22 y Nano, D) Comunicación Wi-Fi entre ESP332 y broker MQTT E) Lectura del sensor DHT22 cada 60 segundos. F) Envío de datos en formato JSON por MQTT. G) Publicación a tópicos identificados por zona de la marquesina.

Esta arquitectura desacopla completamente el sistema sensorial del procesamiento central, permitiendo mejor escalabilidad e independencia física entre nodos.

Entorno de Desarrollo Visual: Node-RED

Node-RED, ejecutado en la Raspberry Pi, actúa como motor lógico, interfaz gráfica y canal de integración de datos y usuarios. Sus funciones se definen como: A) Suscripción a tópicos MQTT, B) Visualización de datos en tiempo real por mesa (dashboard), C) Activación de alarmas visuales y electrónicas, D) Almacenamiento local en SQLite, E) Control de relés/actuadores vía nodos GPIO, F) Exportación a archivo CSV por lote o por rango de fechas, G) Interfaz web responsiva para PC, tablet o celular.

Base de Datos Local: SQLite

SQLite permite el almacenamiento local, embebido y sin dependencias externas, ideal para la arquitectura compacta del sistema, dentro de sus características se destaca: A) Motor relacional SQL, B) Archivo único de base de datos, C) Alta integridad ACID, D) Compatible con Node-RED mediante nodos específicos, E) Bajo consumo de recursos.

Durante la investigación se dio uso para la inserción de registros cada minuto por sensor; asociación de datos a número de lote (ingresado por el usuario) y consultas filtradas por lote o fecha desde el panel de estadísticas.

Red Privada Virtual y Acceso Remoto: ZeroTier

ZeroTier es una herramienta que facilita la creación de una red virtual tipo VPN entre una Raspberry Pi y los dispositivos previamente autorizados, permitiendo establecer una comunicación directa y segura gracias a su conectividad P2P con encriptación de extremo a extremo. Una de sus principales ventajas es su compatibilidad multiplataforma, ya que funciona en sistemas operativos como Linux, Windows, Android e iOS, lo que amplía considerablemente sus posibilidades de uso. Además, no requiere conocimientos avanzados en configuración de redes, pues gestiona de forma automática el NAT traversal, lo que simplifica el proceso de conexión. En su versión gratuita, ZeroTier permite integrar hasta 10 dispositivos por red, lo que resulta suficiente para aplicaciones personales, académicas o de proyectos pequeños. En cuanto a su aplicación, posibilita el acceso remoto a la interfaz de la Raspberry Pi desde cualquier ubicación con conexión a internet, otorgando a los usuarios autorizados la capacidad de ingresar a través de una IP virtual asignada, lo que garantiza tanto la seguridad como la facilidad de administración en entornos distribuidos.

Actuadores: Relés Controlados desde GPIO de ESP32

En el sistema implementado se habilitó el control manual de ventiladores y extractores conectados a la marquesina mediante módulos relé enlazados a los pines GPIO de la Raspberry Pi, lo que permite gestionar de forma directa el encendido y apagado de estos dispositivos. Los módulos empleados son de 5V, compatibles con control lógico de bajo nivel, y ofrecen la capacidad de conmutar cargas tanto de corriente alterna (AC) como de corriente continua (DC), lo que asegura su versatilidad para manejar ventiladores y extractores de distintas especificaciones. La operación se integra a través de nodos “rpi-gpio out” en Node-RED, los cuales permiten traducir las órdenes digitales en acciones físicas sobre los relés. Para el usuario, la interfaz está diseñada con botones intuitivos de encendido y apagado, facilitando la interacción sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados. Además, la arquitectura de flujos del sistema ofrece escalabilidad, ya que es posible añadir en etapas posteriores funciones de control automático condicional, como por ejemplo programar que, si la humedad supera el 80 %, el ventilador se encienda de forma autónoma, integrando así mayor nivel de automatización y eficiencia en el proceso.

Conclusión Técnica

La integración de estos recursos tecnológicos permitió construir un sistema distribuido, robusto y modular, con comunicaciones inalámbricas ligeras (MQTT), almacenamiento local eficiente (SQLite), control en tiempo real (Node-RED + GPIO), y acceso local y remoto seguro (LAN + ZeroTier). Esta arquitectura cumple los criterios de bajo costo, escalabilidad, interoperabilidad y usabilidad exigidos para un sistema destinado a productores rurales de cacao.

El secador en el cual se va a emplear el sistema HMI desarrollado es de tipo marquesina el cual consiste en una estructura rectangular en tubo PVC con un recubrimiento plástico, en la

cual además de los sensores de temperatura y humedad, tradicionalmente se incorporan ventilador para incorporar aire fresco externo y extractores de aire para el control de la humedad interna.

El objetivo es que, a partir de la información registrada por los sensores instalados en cada una de las mesas de secado (temperatura y humedad relativa), el sistema pueda tomar decisiones para activar o desactivar ventiladores y extractores, ya sea de forma manual desde la interfaz o de forma automática en una fase futura del proyecto. Esto permitirá mantener condiciones estables y adecuadas para el secado, incluso en contextos de alta humedad ambiental o baja radiación solar.

En resumen, el modelo de seguimiento y monitoreo del secado propuesto en este trabajo permite hasta cierto punto un control sobre el proceso e integra el conocimiento tradicional de los productores, los criterios técnicos definidos en el proyecto macro, y el uso de tecnologías de automatización accesibles, con el objetivo de mejorar la calidad del grano, reducir pérdidas, y fortalecer la trazabilidad del proceso. Los resultados obtenidos en cada fase metodológica confirman el cumplimiento de los objetivos específicos propuestos, demostrando la importancia de la aplicación de la norma como una herramienta tecnológica útil, confiable y adaptada a las condiciones reales del entorno agrícola donde se pretende implementar.

Etapas de diseño e implementación de la interfaz HMI bajo la norma ISA 101

La norma ANSI/ISA-101.01-2015 proporciona un enfoque sistemático para el diseño, desarrollo, implementación y mantenimiento de interfaces Hombre-Máquina (HMI) en sistemas de automatización industrial. Este enfoque está estructurado en un ciclo de vida que guía cada fase del desarrollo de la HMI, desde la planificación inicial hasta el mantenimiento en operación

(ANSI/ISA, 2015). A continuación, se describe cómo se aplicaron estas fases en el desarrollo del presente proyecto:

Filosofía HMI

Se definieron principios rectores centrados en la accesibilidad, facilidad de uso y comprensión por parte de usuarios rurales. La interfaz debía permitir monitoreo en tiempo real, control manual de ventiladores y extractores, registro de lotes y trazabilidad, todo esto con una interfaz sencilla y robusta que pudiera ser comprendida y utilizada sin formación técnica especializada.

Guía de estilo

Se diseñaron lineamientos visuales claros para toda la interfaz: uso de colores estandarizados (verde, amarillo, rojo), botones grandes y legibles, etiquetas breves, tipografía de alto contraste y navegación jerárquica clara, basada en menús sencillos y consistentes.

Caja de herramientas

Se seleccionaron recursos tecnológicos adecuados al contexto rural:

Raspberry Pi 5 como unidad de procesamiento central.

Node-RED para desarrollo visual de la lógica y la HMI.

Microcontrolador SP32

Sensores DHT22 conectados a microcontroladores ESP32.

Comunicación MQTT como protocolo ligero.

Base de datos SQLite para almacenamiento embebido.

ZeroTier para acceso remoto seguro.

Estas herramientas fueron elegidas por su bajo costo, facilidad de mantenimiento, y compatibilidad con redes locales o rurales sin infraestructura avanzada.

Diseño del sistema HMI

Se estructuró una arquitectura distribuida basada en el modelo cliente-servidor.

Diseño de pantallas

Las pantallas se diseñaron siguiendo una estructura jerárquica intuitiva:

Pantalla de inicio con validación de usuario.

Menú principal con resumen general de las tres mesas de secado.

Submenús por mesa, con gráficos en tiempo real y datos tabulados.

Panel de control para ventiladores y extractores.

Módulo de estadísticas y opción de exportación.

Cada pantalla fue pensada para minimizar errores y facilitar la toma de decisiones por parte del usuario.

Implementación

Se desarrollaron todos los flujos de control, (ver apéndice B), visualización y almacenamiento en Node-RED. Se configuró el sistema para ejecutarse automáticamente con el encendido de la Raspberry Pi. Se implementaron alarmas visuales, notificaciones por correo electrónico y funcionalidades de control manual. El sistema fue accesible tanto de forma local (LAN) como remota (ZeroTier).

Verificación y prueba

Se realizaron pruebas funcionales en un entorno simulado. Se evaluaron la estabilidad del sistema, precisión de sensores, activación correcta de alarmas, exportación de datos, accesibilidad multiplataforma y usabilidad general. Los resultados fueron satisfactorios en todas las métricas.

Operación y mantenimiento

Se elaboró una guía básica de operación para los usuarios, con instrucciones claras sobre cómo encender el sistema, registrar un lote, acceder a estadísticas o exportar datos. También se definió un plan de mantenimiento preventivo básico para sensores, respaldos y actualizaciones, ver apéndice A.

La arquitectura quedó preparada para incorporar automatización futura en el control de actuadores. La Tabla 2 muestra un resumen de las etapas del ciclo de vida HMI

Tabla 2

Resumen de las etapas del ciclo de vida HMI

Etapas del ciclo según ISA 101	Aplicación en el proyecto.	Ejemplos del flujo Node-RED	Componentes/nodos usados
Filosofía HMI	Enfoque centrado en el usuario rural con baja formación técnica. Requiere simplicidad, accesibilidad y robustez.	Interfaz limpia, navegación sencilla, botones grandes y textos legibles.	ui-template, ui-button, ui-text
Guía de estilo	Uso de colores estandarizados (verde, amarillo, rojo), jerarquía visual, etiquetas claras.	Indicadores LED (verde: activo, rojo: fallo), uso de <hr> para dividir áreas.	ui-led, ui-template
Caja de herramientas	Selección de tecnologías asequibles y adaptadas al entorno rural.	Raspberry Pi 5, Node-RED, MQTT, DHT22, ESP32, SQLite, ZeroTier.	mqtt in/out, function, ui-dashboard, rpi-gpio, sqlite

Diseño del sistema HMI	Arquitectura cliente-servidor. Sensores publican vía MQTT. Raspberry centraliza visualización y control.	Publicación de datos por tópicos como /m1/temp, /m2/hum.	mqtt in, function, sqlite, ui-chart
Diseño de pantallas	Jerarquía por pantallas: inicio, menú principal, vista por mesa, panel de control y estadísticas.	Menú de navegación entre mesas y panel principal, gráficas en tiempo real.	ui-gauge, ui-chart, ui-dropdown, ui-template
Implementación	Desarrollo completo del flujo en Node-RED, conexión con sensores y base de datos. Inicio automático al prender la Raspberry.	Flujos activos que controlan la visualización, lectura de sensores, alarmas, y descarga CSV.	inject, mqtt in, function, csv, sqlite, ui-*
Verificación	Pruebas funcionales en entorno simulado: estabilidad, precisión, conectividad y respuesta a condiciones críticas.	LEDs cambian color según estado, envío de alertas si temperatura > 75 °C. o según lo programado.	function, ui-led, mqtt in, email, debug
Operación y mantenimiento	Manual de usuario básico. Sistema accesible desde LAN o ZeroTier. Plan de mantenimiento para sensores y respaldo.	Acceso web desde PC, tablet o celular; respaldo de datos con exportación CSV.	ui-template, csv, file, sqlite.

Fuente. Autor

Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de grado permitió implementar de manera exitosa una interfaz Hombre-Máquina (HMI) basada en Raspberry Pi 5, orientada al monitoreo y control del proceso de secado de cacao tipo marquesina, bajo los lineamientos de la norma ANSI/ISA-101.01-2015. A continuación, se exponen las conclusiones alcanzadas en relación con los objetivos planteados:

Respecto al objetivo específico 1 se logra identificar de forma clara y fundamentada las variables críticas para garantizar un secado eficiente del grano de cacao: temperatura ambiental externa, temperatura interna y humedad relativa en tres zonas específicas del secador. Estas variables fueron seleccionadas con base en literatura especializada, normas aplicables, y conocimiento empírico del entorno productivo local. Adicionalmente, se incorporó la variable de trazabilidad temporal mediante el registro del lote y la duración del secado, lo cual fortalece el seguimiento del proceso y la calidad final del producto.

Respecto al objetivo específico 2, se logra determinar las especificaciones técnicas para la construcción de la HMI, estableciendo requerimientos técnicos precisos basados tanto en la norma ISA 101 como en las condiciones reales de uso por parte de pequeños productores rurales. Estos incluyeron criterios de diseño gráfico intuitivo, accesibilidad desde múltiples dispositivos, visualización jerárquica, incorporación de alarmas visuales y electrónicas, exportación de datos, y control de actuadores. Las tecnologías seleccionadas (Node-RED, MQTT, SQLite, ZeroTier) y los elementos físicos (Raspberry Pi 5, sensores DHT22, microcontroladores ESP32) demostraron ser adecuados, económicos y sostenibles para este contexto.

Respecto al objetivo específico 3, se logra desarrollar la HMI sobre Raspberry Pi 5 para el sistema de secado tipo marquesina, logrando concretar una HMI funcional, adaptable, y contextualizada, capaz de integrarse con sensores distribuidos, recibir datos en tiempo real,

generar alertas, almacenar registros históricos y permitir su consulta o exportación. La HMI fue implementada utilizando Node-RED como plataforma visual, garantizando una arquitectura modular y escalable. Las pruebas funcionales demostraron estabilidad, precisión de lectura, buena experiencia de usuario y capacidad de acceso remoto a través de ZeroTier, cumpliendo satisfactoriamente con los criterios de operación establecidos.

El cumplimiento integral de los objetivos demuestra que la HMI desarrollada no solo representa una solución tecnológica efectiva, sino también una herramienta práctica que fortalece el control del proceso poscosecha del cacao. Esta implementación tiene el potencial de contribuir significativamente a la mejora de la calidad del producto, la eficiencia operativa y la toma de decisiones por parte de los productores, promoviendo el uso de tecnologías accesibles y adaptadas al entorno rural colombiano.

Recomendaciones

Implementar en campo real: se recomienda desplegar el sistema en una unidad productiva real para validar su desempeño bajo condiciones ambientales variables y en situaciones operativas reales. Esto permitirá hacer ajustes técnicos finales y recopilar retroalimentación directa de los usuarios.

Automatizar el control de actuadores: Si bien el sistema actual permite el control manual de ventiladores y extractores, se sugiere desarrollar una lógica de control automático basada en umbrales críticos de temperatura y humedad para mejorar la eficiencia del proceso de secado.

Ampliar cobertura sensorial: Considerar la integración de sensores adicionales (luminosidad, CO₂ u otros) que puedan proporcionar información más completa sobre las condiciones del secador y contribuir a decisiones más precisas.

Mejorar experiencia de usuario: Incorporar elementos gráficos más avanzados (por ejemplo, indicadores animados o asistencias visuales), accesibilidad por voz y versiones móviles optimizadas para smartphones.

Capacitación técnica básica: Diseñar material didáctico y sesiones de capacitación dirigidas a los productores para asegurar el uso autónomo y correcto del sistema, especialmente en zonas donde el acceso a tecnologías aún es limitado.

Establecer respaldo en la nube: Aunque el sistema utiliza almacenamiento local, sería conveniente implementar un respaldo automático en la nube para garantizar la disponibilidad y seguridad de los datos a largo plazo.

Referencias Bibliográficas

- ANSI/ISA-101. (2015). *Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*. Estados Unidos.
- Barbosa, G., & Vega, H. (2000). *Deshidratación de alimentos*. Zaragoza: Acribia.
- Beckett, S. T. (2009). *Industrial Chocolate Manufacture and Use*. *Industrial Chocolate Manufacture and Use*. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781444301588>
- Cardona, L. M. (2016). *Influencia del proceso de fermentación sobre las características de calidad del grano de cacao (Theobroma cacao)*. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59884>
- Chica Barco, V. (2022). *Secado de granos de cacao (variedad TCS01) y su efecto sobre la concentración de compuestos fenólicos, azúcares y ácidos orgánicos* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Administración, Palmira, Colombia. UN Repositorio digital: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83378>
- Contributors, O. F. (s.f.). *node red*. Obtenido de node red: <http://nodered.org>
- Electronics.com.bd. (s. f.). *DHT22 digital temperature humidity sensor module* [Fotografía]. Electronics.com.bd. Recuperado el 29 de septiembre de 2025, de https://www.electronics.com.bd/sensor-module/dht22-digital-temperature-humidity-sensor-module?srsltid=AfmBOopsLXFu2ispMe6t_LJd2GXAghzvMzXZRrdxh71pkMpvubj-UTKZ
- Estrada, J. M. (2021). *Marquesinas* [Fotografía]. JM Estrada. <https://jmestrada.com>

Fundación Natura Colombia. (2025). *Fundación Natura*. Obtenido de Natura.org.co:

<http://www.natura.org.co>

ICONTEC. (2021). NTC 1252: 2021 Cacao en grano. Especificaciones y requisitos de calidad.

NTC 1252: 2021 Cacao en grano. Especificaciones y requisitos de calidad. Colombia:

ICONTEC.

iménez, J. (2000). *Efectos de dos métodos de fermentación sobre la calidad de tres grupos de*

cacao cultivados en la zona de Quevedo, provincia de Los Ríos [Tesis de pregrado,

Universidad Estatal de Bolívar].

Lehmann, G., & Wilkins, M. (Co-chairs). (2015). *ANSI/ISA-101.01-2015: Human Machine*

Interfaces for Process Automation Systems. International Society of Automation.

Manz. (s. f.). *Lenguaje JS*. <http://lenguajejs.com>

Nieblas, A., Cota, G., Gutiérrez, J., & García, L. (2023). *Node-RED: Desarrollo de aplicaciones*

basadas en flujos para el Internet de las Cosas. *Revista de Innovación y Tecnología*,

12(3), 45–58. <https://doi.org/10.xxxx/rit.2023.12345>

Node-RED. (2025). *Flow-based programming for the Internet of Things*. Node-RED.

Recuperado el 20 de julio de 2025, de <https://nodered.org/>

Observatorio de Responsabilidad Social Universitaria- Universidad Santo Tomás, B. (2022).

Obtenido de

https://rsu.ustabuca.edu.co/images/DOCUMENTOS_OBSERVATORIO/Informes_Flash

[/2022/Produccion_Dinamicas_Cacao_Santander.pdf](https://rsu.ustabuca.edu.co/images/DOCUMENTOS_OBSERVATORIO/Informes_Flash/2022/Produccion_Dinamicas_Cacao_Santander.pdf)

Raspberry Pi. (2012). *Raspberry Pi*. <http://www.raspberrypi.com>

Raspberry. (2025). *Raspberry Pi* [Fotografía]. Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/>

Universidad Politécnica Salesiana. (2014). *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad

Politécnica Salesiana: <http://www.ups.edu.ec>

Zorrilla, J. (2019). *Internet de las cosas* [Fotografía]. Internet de las Cosas.

<https://www.internetdelascosas.cl/>

Apéndices

Apéndice A Manual de operación HMI

Nombre del sistema: Sistema de Monitoreo y Control de Secado de Cacao tipo Marquesina

Versión: 1.0

Plataforma: Raspberry Pi 5 + Node-RED

Acceso: Local (LAN) y Remoto (ZeroTier)

1. ¿Para qué Sirve este Sistema?

Este sistema permite al productor ver y controlar el proceso de secado del cacao dentro de una marquesina. Desde una pantalla, tablet o celular, usted podrá:

- Ver en tiempo real la temperatura y humedad en cada mesa del secador.
- Saber si el sistema está funcionando correctamente.
- Registrar el número de lote para llevar control del secado.
- Activar o desactivar ventiladores y extractores (modo manual).
- Descargar los datos del secado en un archivo.
- Recibir alertas cuando las condiciones sean inadecuadas.

2. ¿Cómo Acceder a la Interface?

Acceso local (dentro del lugar de secado):

- Conecte un monitor con cable micro HDMI a HDMI , teclado y mouse a la Raspberry Pi.
- Encienda la Raspberry.
- El sistema se abre automáticamente con la interfaz HMI.

Acceso por red (LAN):

- Conéctese al mismo router local que la Raspberry.
- Abra el navegador e ingrese la dirección: <http://raspberrypi.local:1880/ui> o IP local.

Acceso remoto (desde otra ubicación):

- La configuración en ZeroTier se empieza según estas instrucciones:

<https://docs.zerotier.com/start/>

Asegúrese de tener ZeroTier instalado y configurado en el dispositivo que vas a usar para conectarte.

Se requiere tener el Network ID.

En Windows:

Haz clic derecho en el ícono de ZeroTier (en la bandeja del sistema).

Selecciona **Join Network**.

Escribe el Network ID.

En Android/iOS:

Abre la app ZeroTier One.

Toca el botón "+" para añadir una red.

Escribe el Network ID y activa el interruptor para unirse.

Luego confirme que el administrador de RED le autorice el acceso a la RED.

Parte	Valor	Descripción
Protocolo	http	El tipo de protocolo usado (HTTP, HTTPS, FTP, etc.)
Dirección	192.168.192.10	Dirección IP del dispositivo que sirve la aplicación

Puerto	1880	Puerto donde escucha la aplicación (por defecto en Node-RED es 1880)
Ruta	/ui	Ruta específica del recurso (en este caso, la interfaz gráfica del dashboard)

Una vez autorizado, puede conectarse via interfaz web o basada en navegador, escribiendo en el navegador lo siguiente: protocolo://dirección:puerto/ruta.

Ejemplo: http://192.168.192.10:1880/ui

3. Pantallas principales

Pantalla de Inicio:

- Solicita usuario y contraseña: Usuario es un correo electrónico y la contraseña un carácter alfanumérico, previamente creados en el menú del administrador.

- Luego de ingresar y autenticar estos datos le permite el ingreso al menú principal.

Panel principal:

- Muestra un resumen general de las tres mesas.
- Indicadores LED de estado (verde, rojo o negro).
- Botones para ir a cada mesa o módulo.

Vista por mesa:

- Lecturas en tiempo real de temperatura y humedad.
- Indicadores tipo reloj y tanque.
- LED de estado.
- Registro del número de lote.

Panel de control:




- Botones para encender/apagar ventiladores y extractores.

Estadísticas:

- Consultar datos por fecha o por lote.

- Botón para descargar archivo .CSV.

4. Significado de los colores del LED

Color	Significado
 Verde	Sensor conectado y datos correctos
 Rojo	Sensor sin datos o fuera de rango
 Negro	Sensor no responde o desconectado

5. Alertas

- Si la temperatura es mayor a 75 °C, se muestra alerta visual.

- Se puede configurar para que también se envíe correo electrónico.

Los valores de alarmas se pueden configurar en los flujos de Node-RED.

6. ¿Cómo registrar un lote?

1. Ingrese al submenú de una mesa.
2. Escriba el número del lote en el campo correspondiente.
3. Presione “Guardar” o “Registrar”.

7. ¿Cómo exportar los datos?

1. Vaya a la pestaña Estadísticas.
2. Elija un rango de fechas o número de lote.
3. Haga clic en “Exportar CSV”.

4. El archivo se descarga y puede abrirse en Excel.

8. Recomendaciones de uso

- No apague la Raspberry directamente. Use el botón de apagado si está disponible.
- Verifique que los sensores estén limpios y conectados.
- Realice copia de seguridad periódica de los archivos .csv.
- En caso de desconexión, revise que la red esté funcionando.

9. Mantenimiento básico

- Sensores: limpiar cada semana con un paño seco.
- Sistema: revisar actualizaciones de Node-RED o Raspbian cada 6 meses.
- Base de datos: hacer respaldo mensual si se usa en producción real.
- Conectividad: confirmar que ZeroTier esté activo y actualizado.

10. Soporte

Para asistencia técnica, contactar con la Universidad Nacional Abierta y Distancia (UNAD), zona oriente, ECBTI – Ingeniería Electrónica.

Apéndice B Diagramas de flujo

Diagrama No 1. Inicio de sesión

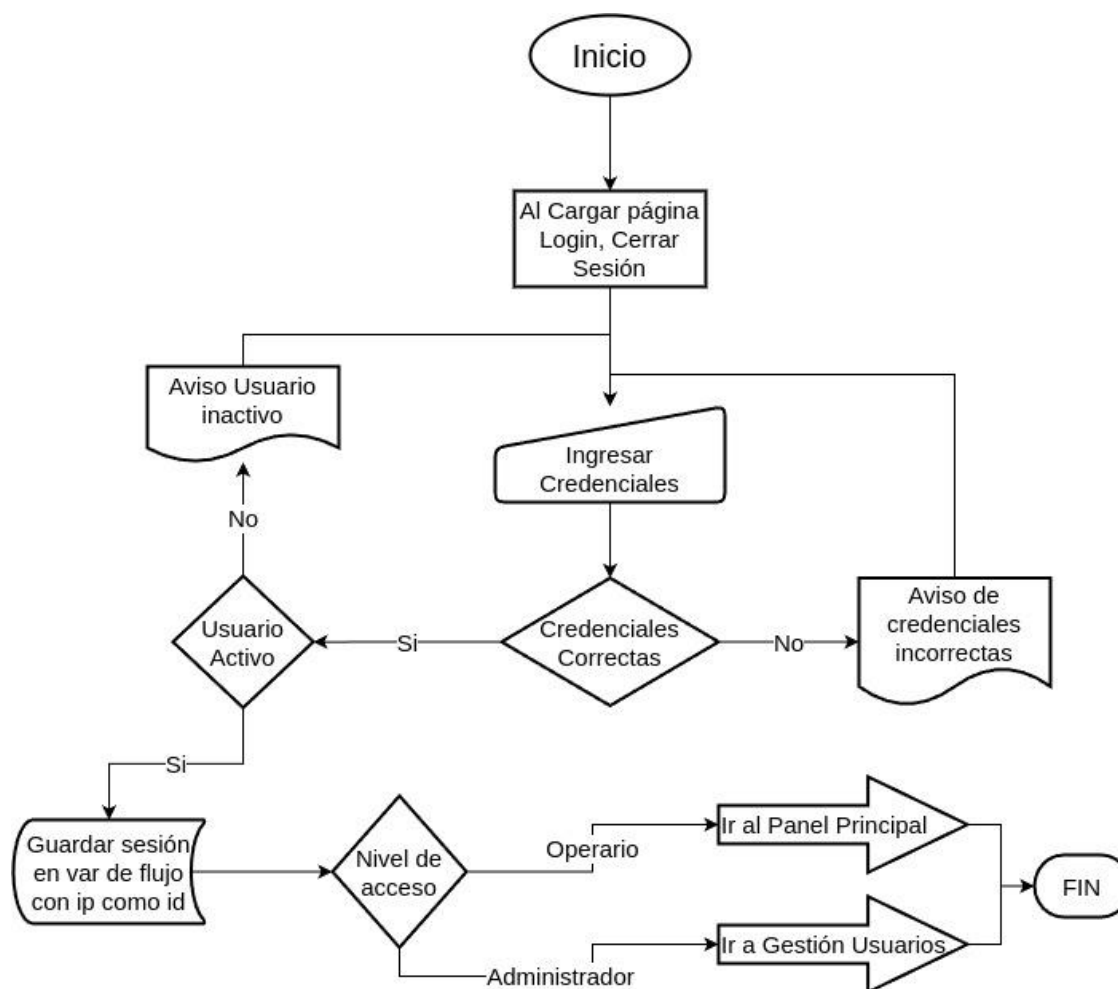


Diagrama No 2. Validación de usuario.

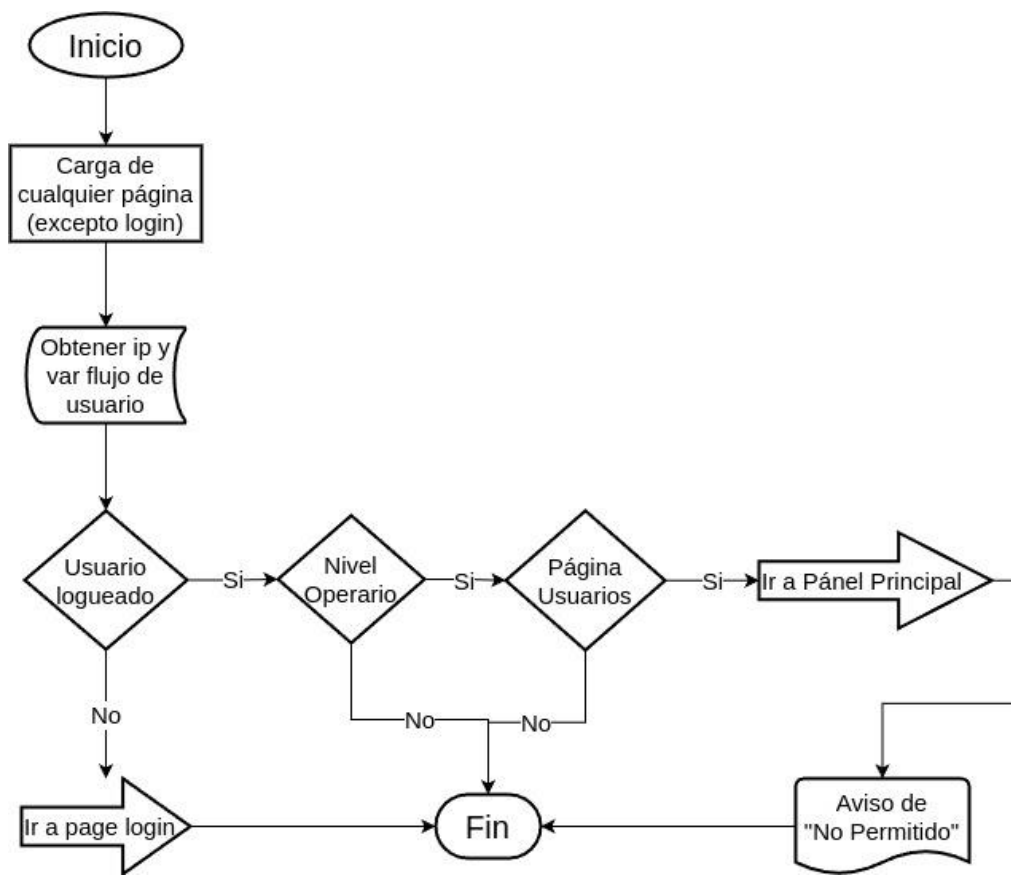


Diagrama No 3. Obtención de datos temperatura MQTT.

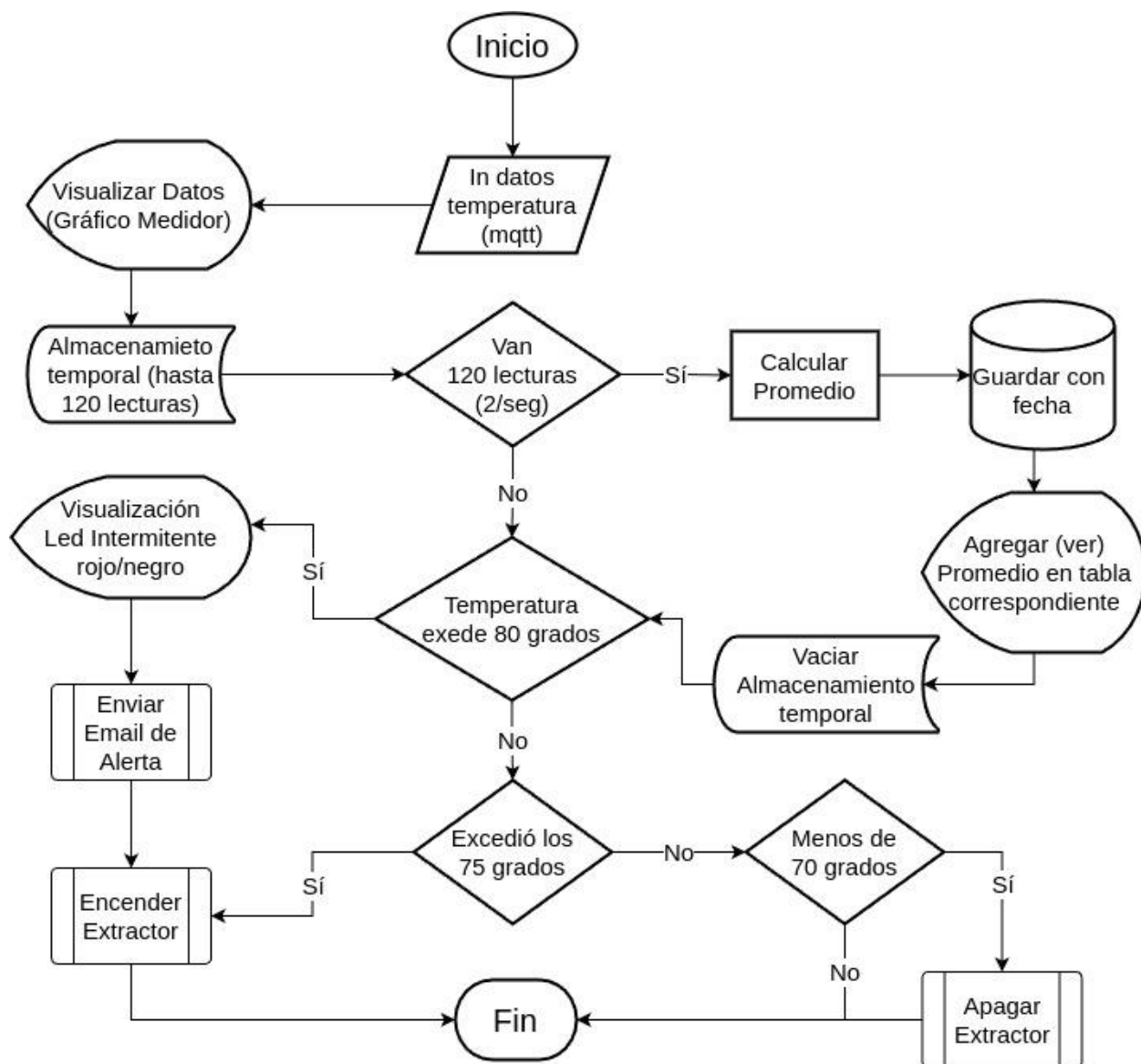


Diagrama No 4. Revisión estado SP32.

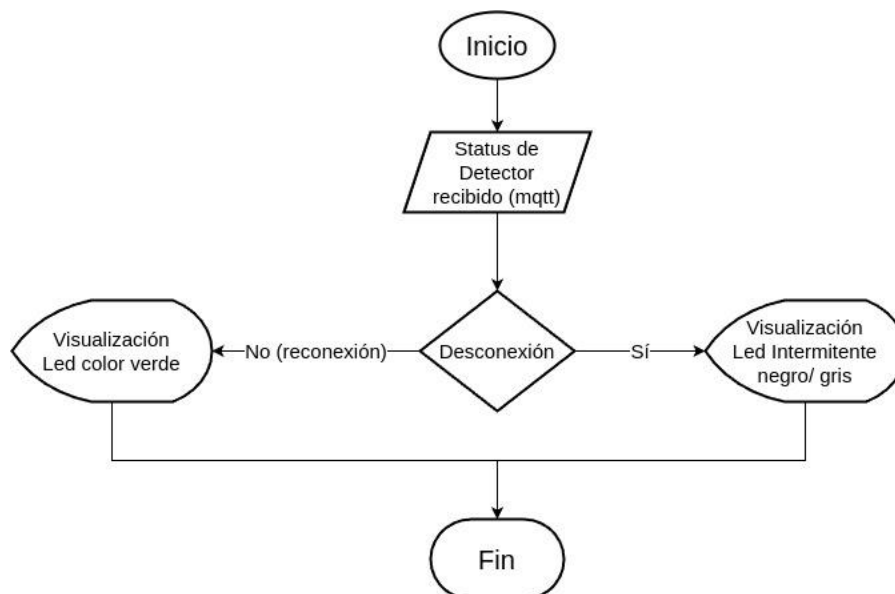


Diagrama No 5. Control ventilador / Extractor.

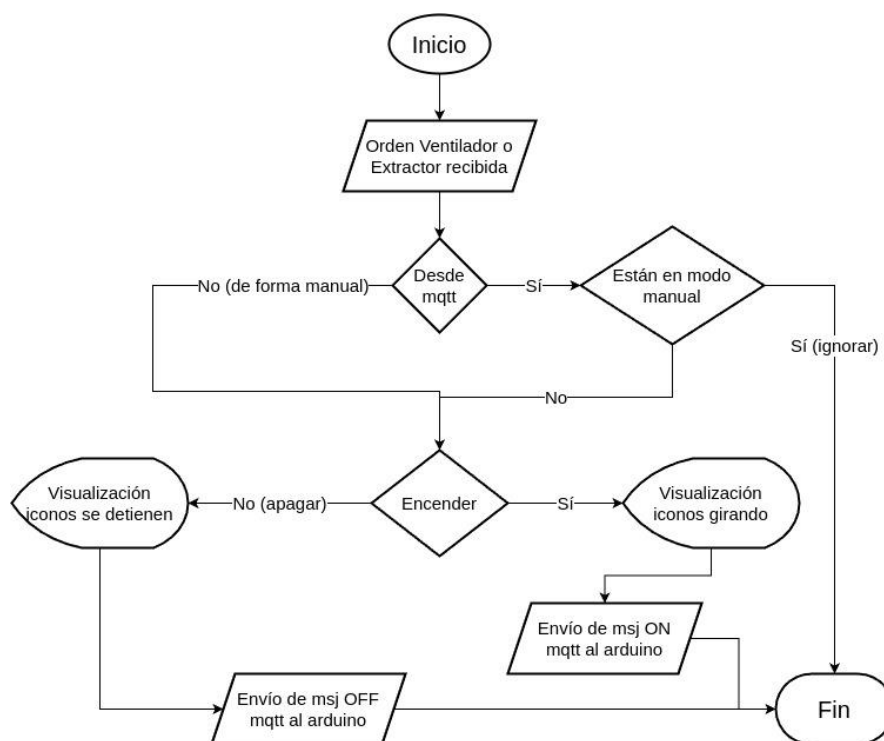


Diagrama No 6. Alerta por mail

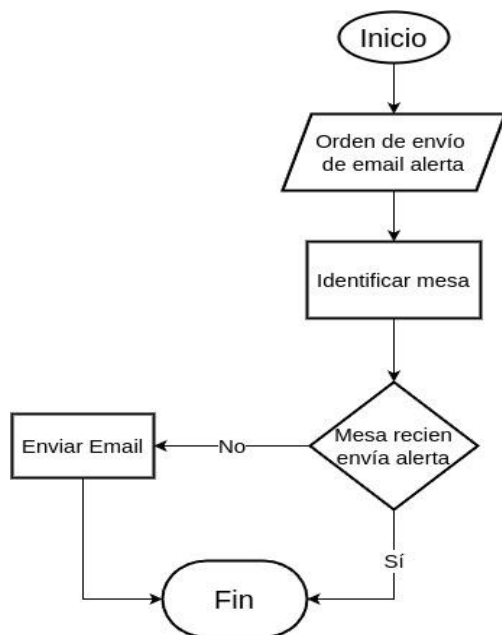


Diagrama No 7. Estadísticas

