Design of an Arduino-Based Automated System for Monitoring the Parchment Coffee Drying Process

Alvarado-Velásquez Leonardo, Estudiante Ing. Industrial [1] *,Cerquin Galvez Antoni Smith, Estudiante Ing. Industrial*[2] *,Cruzado Alva Ariana Yasell, Estudiante Ing. Industrial* [3] .

[1-3] *Universidad Privada del Norte* ***n00339182@upn.pe, n00383650@upn.pe, n00374864@upn.pe***.

Abstract- The drying of parchment coffee is a critical post-harvest stage for preserving grain quality, particularly in producing areas such as San Ignacio, Peru, where environmental conditions can make uniform drying difficult. This study proposes the design and simulation of a low-cost Arduino-based automated system for monitoring and controlling temperature during the parchment coffee drying process. The methodology involved the design of a virtual prototype using an Arduino Uno, a DHT22 sensor, a relay module, a servo motor, and an LED indicator, implemented and evaluated through the Wokwi platform. The system incorporates a control logic that activates the heating system when the temperature is below 30 °C and activates the ventilation mechanism when the temperature exceeds 35 °C, while continuously monitoring relative humidity. Simulation results showed the operation of the control logic and the response of the components under different temperature scenarios. The proposed system represents an accessible technological alternative for automating process monitoring. As a next step, physical validation under real conditions is proposed, considering system performance, energy consumption, and its potential effect on coffee quality, as well as evaluating its technical and economic feasibility with producers in San Ignacio.

Keywords- Arduino, parchment coffee, drying, automation, Wokwi.

Diseño De Un Sistema Automatizado Para El Monitoreo Del Proceso De Secado De Café Pergamino Mediante Arduino

Alvarado-Velásquez Leonardo, Estudiante Ing. Industrial [1] ,*Cerquin-Galvez Antoni Smith, Estudiante Ing. Industrial*[2] ,*Cruzado Alva Ariana Yasell, Estudiante Ing. Industrial* [3]

[1-3] *Universidad Privada del Norte* ***n00339182@upn.pe, n00383650@upn.pe, n00374864@upn.pe***.

Resumen: El secado del café pergamino es una etapa crítica para preservar la calidad del grano, especialmente en zonas productoras como San Ignacio, Perú, donde las condiciones ambientales pueden dificultar un secado uniforme. Este estudio propone el diseño de un sistema automatizado de bajo costo basado en Arduino para el monitoreo y control de temperatura y humedad durante el proceso de secado. La metodología comprendió el diseño de un prototipo virtual utilizando Arduino Uno, un sensor DHT22, un módulo relé, un servomotor y un LED, implementado y evaluado mediante la plataforma Wokwi. El sistema incorpora una lógica de control que activa el calentamiento cuando la temperatura es inferior a 30 °C y acciona la ventilación cuando supera los 35 °C, mientras monitorea continuamente la humedad relativa. Los resultados de la simulación demostraron el funcionamiento de la lógica de control y la respuesta de los componentes ante diferentes escenarios de temperatura. La propuesta constituye una alternativa tecnológica accesible para automatizar el monitoreo del proceso. Como siguiente etapa, se plantea realizar la validación física en condiciones reales, considerando el desempeño del sistema, el consumo energético y su posible efecto sobre la calidad del café, así como evaluar su factibilidad técnica y económica con productores de San Ignacio.

Palabras clave: Arduino, café pergamino, secado, automatización, Wokwi.

I. INTRODUCCIÓN:

El café es uno de los productos agrícolas de mayor importancia económica a nivel mundial, ya que constituye el sustento de millones de familias dedicadas a su cultivo, procesamiento y comercialización. Asimismo, representa uno de los productos básicos más comercializados en el mercado internacional, generando un impacto significativo en las economías de los países productores. Según la International Coffee Organization (ICO) [1], la producción mundial de café supera los 170 millones de sacos anuales y su consumo continúa mostrando una tendencia creciente, impulsado por la demanda de cafés de alta calidad y de origen sostenible.

En este contexto, la calidad del café depende en gran medida de las actividades desarrolladas durante la etapa de postcosecha, siendo el proceso de secado uno de los factores más determinantes para conservar las propiedades físicas, químicas y sensoriales del grano [2]. Un secado inadecuado puede ocasionar fermentaciones no deseadas, proliferación de microorganismos, aparición de defectos físicos y disminución del valor comercial del producto. Guevara-Sánchez et al. [2] estudiaron el efecto de las condiciones de secado sobre la calidad del café y resaltaron la importancia de controlar adecuadamente este proceso para preservar las características del producto.

El Perú es reconocido como uno de los principales productores y exportadores de café arábica en América Latina. La caficultura constituye una de las actividades agrícolas más importantes para miles de pequeños productores, especialmente en regiones como Cajamarca, San Martín, Amazonas y Junín, donde representa una importante fuente de empleo e ingresos para las familias dedicadas a esta actividad [3]. En particular, la región Cajamarca destaca por la producción de cafés especiales; dentro de ella, la provincia de San Ignacio constituye una zona de importante actividad cafetalera.

Sin embargo, las condiciones climáticas de San Ignacio, caracterizadas por una elevada humedad ambiental, precipitaciones frecuentes y variaciones de temperatura, pueden dificultar el proceso de secado del café. Una parte de los productores emplea métodos tradicionales de secado en tendales abiertos, los cuales dependen de las condiciones climáticas y de la experiencia del agricultor [4]. Esta dependencia puede dificultar el control uniforme de las condiciones de secado y aumentar el riesgo asociado a una humedad excesiva. Como antecedente relevante, Barzola-Cárdenas et al. [4] desarrollaron un secador solar automatizado para café pergamino en Jaén, Perú, incorporando el monitoreo de la humedad como parte del proceso de secado.

Frente a esta problemática, la incorporación de tecnologías de automatización constituye una alternativa para mejorar el monitoreo y control de las condiciones de secado. El uso de microcontroladores y sensores electrónicos permite registrar variables ambientales y generar respuestas automáticas de acuerdo con parámetros previamente establecidos. En este contexto, Arduino representa una plataforma accesible para el desarrollo de sistemas de automatización debido a su facilidad de programación, flexibilidad y disponibilidad de componentes. Asimismo, Prada et al. [5] evaluaron un sistema de secado solar con flujo continuo de aire impulsado por energía fotovoltaica en la región San Martín, reportando resultados favorables en la reducción del tiempo de secado y en la uniformidad del producto final.

A pesar de estos avances, existe la necesidad de continuar

desarrollando alternativas tecnológicas de bajo costo orientadas a pequeños productores cafetaleros de la provincia de San Ignacio. Una solución basada en componentes electrónicos accesibles podría facilitar el monitoreo de variables relevantes durante el secado y servir como base para una futura implementación adaptada a las condiciones locales.

En respuesta a esta necesidad, la presente investigación propone el diseño y simulación de un sistema automatizado basado en Arduino para el monitoreo de la temperatura y la humedad relativa, así como el control automático de la temperatura durante el proceso de secado de café. El sistema integra un sensor digital DHT22 para el monitoreo continuo de la temperatura y humedad relativa, un módulo relé que simula el accionamiento de una resistencia calefactora y un servomotor encargado de representar la apertura de una compuerta de ventilación cuando la temperatura supera el umbral programado. De esta manera, se plantea una arquitectura de control sencilla y de bajo costo que puede constituir una base para una futura implementación física.

Asimismo, la propuesta busca establecer una primera etapa para evaluar posteriormente su factibilidad de implementación en el contexto productivo de San Ignacio. Esta evaluación futura deberá considerar el desempeño del sistema en condiciones reales, el consumo energético, los costos de implementación, la facilidad de uso y su aceptación por parte de los productores. Por ello, el presente estudio se concentra en la validación funcional de la lógica de control mediante simulación, dejando para una etapa posterior la evaluación de su desempeño en condiciones reales.

Con el propósito de evaluar el funcionamiento del sistema antes de una posible implementación física, se empleó la plataforma Wokwi. Este entorno permitió analizar el comportamiento del algoritmo de control bajo diferentes escenarios de temperatura y verificar la respuesta de los sensores y actuadores, así como la lógica de decisión implementada en el microcontrolador Arduino.

II.METODOLOGÍA

A. Tipo y Diseño de la Investigación: La presente investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como finalidad desarrollar una solución tecnológica orientada al monitoreo y control de variables ambientales durante el proceso de secado de café pergamino mediante la automatización.

Asimismo, presenta un enfoque cuantitativo, debido a que el funcionamiento del sistema se evaluó mediante el registro de variables físicas medibles, principalmente la temperatura y la humedad relativa, permitiendo analizar la respuesta del sistema ante diferentes condiciones de operación.

El diseño de la investigación es experimental a nivel de simulación. Se desarrolló un prototipo virtual cuyo funcionamiento fue evaluado mediante diferentes escenarios de temperatura y humedad en la plataforma Wokwi. Este enfoque permitió verificar la lógica de control programada y la respuesta de los componentes electrónicos antes de una posible implementación física.

B. Materiales y Herramientas: Para el desarrollo del sistema automatizado se utilizaron diferentes componentes electrónicos que permitieron realizar el monitoreo de la temperatura y humedad relativa, así como representar las acciones de control durante el proceso de secado del café pergamino. El sistema está compuesto principalmente por un Arduino Uno, un sensor DHT22, un servomotor, un módulo relé y un LED indicador.

El Arduino Uno se utilizó como unidad principal para procesar la información obtenida por el sensor DHT22 y ejecutar las acciones establecidas en el programa. El sensor DHT22 permitió obtener los valores de temperatura y humedad relativa. A partir de las lecturas de temperatura, el sistema determina la acción que debe realizar según los valores establecidos.

Cuando la temperatura registrada es menor a 30 °C, el sistema activa el módulo relé y el LED, simulando el funcionamiento de una resistencia calefactora. Cuando la temperatura supera los 35 °C, el relé se desactiva y el servomotor gira hasta una posición de 90°, representando la apertura de una compuerta de ventilación. Si la temperatura se encuentra entre 30 °C y 35 °C, los actuadores permanecen desactivados. La humedad relativa se monitorea de manera continua y sus valores se muestran mediante el monitor serial durante la simulación.

Para realizar la implementación y las pruebas del sistema se utilizó la plataforma Wokwi, donde se integraron los componentes y se realizaron las conexiones correspondientes. Esta herramienta permitió observar el comportamiento del sistema ante diferentes valores de temperatura y humedad y comprobar el funcionamiento de la lógica de control antes de una posible implementación física.

En la Tabla I se presentan los principales componentes y herramientas utilizados en el desarrollo del sistema, junto con sus características y la función que cumplen dentro del prototipo virtual. Esta información permite identificar los elementos considerados para la implementación del sistema y su relación con las diferentes funciones de monitoreo y control.

TABLA I.
HERRAMIENTAS EMPLEADAS EN EL DESARROLLO DEL SISTEMA

Herramientas	Especificación técnica	Cantidad
Arduino Uno R3	Microcontrolador ATmega328P, alimentación de 5 V	1
Sensor DHT22	Alimentación de 3.3–6 V; rango de temperatura: -40 a 80 °C; humedad: 0–100 % HR	1
Servomotor SG90	Alimentación de 5 V; ángulo de operación de 0° a 180°	1
Módulo relé de un canal	Alimentación de 5 V	1
LED rojo	Tensión de operación: 2 V; corriente nominal: 20 mA	1

Resistencia	1 kΩ	1
Cables de conexión (Jumpers)	Macho-Macho	11
Plataforma Wokwi	Simulador de circuitos electrónicos	1
Arduino IDE	Entorno de programación	1

Los componentes descritos en la **Tabla I** permitieron desarrollar un prototipo virtual capaz de monitorear las variables ambientales involucradas en el proceso de secado del café. El Arduino Uno actuó como unidad central de procesamiento, ejecutando la lógica de control programada a partir de la información proporcionada por el sensor DHT22. Asimismo, el módulo relé simuló la activación del sistema de calefacción cuando la temperatura descendió por debajo del umbral establecido, mientras que el servomotor representó el accionamiento del sistema de ventilación cuando la temperatura superó el valor programado. Finalmente, el uso de la plataforma Wokwi permitió comprobar el comportamiento del sistema durante la simulación, facilitando la detección de errores y los ajustes de la lógica de control antes de una posible implementación física.

C. Diseño del sistema automatizado: El diseño del sistema automatizado se planteó para representar el proceso de secado del café pergamino mediante una estructura de secado con una capacidad referencial de 25 kg por lote, considerando las condiciones de trabajo de pequeños productores. La propuesta contempla la distribución de las bandejas de secado, el sistema de calefacción, el sistema de ventilación y la ubicación del sensor DHT22 para el monitoreo de la temperatura y humedad relativa.

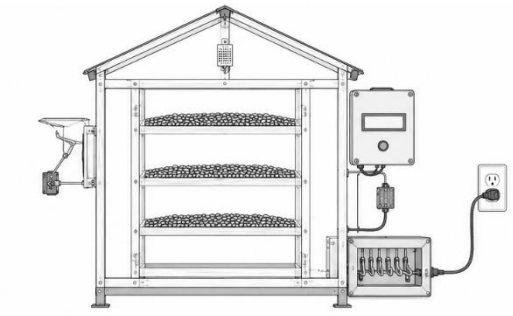


Fig. 1. Vista frontal del diseño conceptual del sistema automatizado.

La figura muestra la disposición interna de las bandejas de secado, el sistema de calefacción y la ubicación del sensor DHT22.



Fig. 2. Vista isométrica del diseño conceptual del sistema automatizado.

La figura 2 muestra la distribución general de la estructura, la unidad de control y el sistema de ventilación.

Las Figuras 1 y 2 presentan el diseño conceptual del sistema automatizado propuesto. La vista frontal permite identificar la disposición de los componentes internos involucrados en el proceso de secado, mientras que la vista isométrica facilita la visualización de la configuración general del equipo y la integración entre la estructura y los elementos de control.

Posteriormente, con base en el diseño conceptual desarrollado, se implementó un prototipo virtual en la plataforma Wokwi, el cual integra un microcontrolador Arduino Uno, un sensor DHT22, un módulo relé, un servomotor y un LED indicador. Esta simulación permitió comprobar la lógica de control propuesta y observar la interacción entre los diferentes componentes electrónicos antes de una posible implementación física.

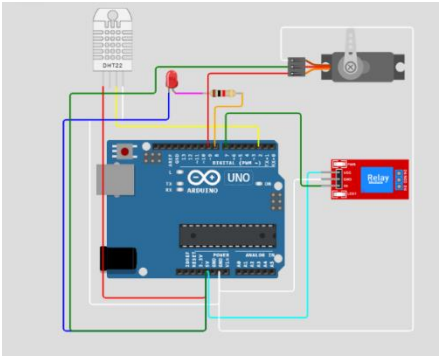


Fig. 3. Arquitectura del sistema automatizado implementado en Wokwi.

La Figura 3 presenta la disposición e interconexión de los elementos electrónicos empleados en el prototipo digital. El Arduino Uno opera como unidad de procesamiento principal, recibiendo los registros de temperatura y humedad relativa del sensor DHT22. Conforme a los valores detectados, el sistema ejecuta la lógica de control establecida y activa el módulo relé, el servomotor y el LED, que representan las funciones de calefacción, ventilación y señalización del sistema automatizado.

D. Procedimiento: El procedimiento para el desarrollo y evaluación del prototipo virtual se realizó mediante cinco etapas, las cuales permitieron organizar el diseño, programación, implementación y simulación del sistema automatizado.

Etapa 1. Diseño del sistema automatizado: En esta etapa se definió la arquitectura general del sistema considerando las necesidades del proceso de secado del café pergamino. Se seleccionaron los componentes electrónicos requeridos, incluyendo el Arduino Uno como unidad de procesamiento, el sensor DHT22 para el monitoreo de temperatura y humedad relativa, un módulo relé para simular el sistema de calefacción, un servomotor para simular el accionamiento del sistema de ventilación y un LED indicador para visualizar el estado de funcionamiento del sistema.

Etapa 2. Programación del algoritmo de control*:* Se desarrolló el algoritmo de control empleando el entorno de programación Arduino IDE. El programa fue diseñado para realizar lecturas periódicas de la temperatura y la humedad relativa mediante el sensor DHT22 con un intervalo de dos segundos.

La lógica implementada estableció tres condiciones de funcionamiento:

- Cuando la temperatura fue inferior a 30 °C, el sistema activó el módulo relé y el LED indicador, simulando el funcionamiento del sistema de calefacción.
- Cuando la temperatura fue superior a 35 °C, el sistema desactivó el relé y accionó el servomotor hasta una posición de 90°, simulando el funcionamiento del sistema de ventilación.
- Cuando la temperatura permaneció entre 30 °C y 35 °C, el sistema permaneció en estado de espera, manteniendo desactivados los actuadores.

La humedad relativa fue registrada continuamente para monitorear las condiciones ambientales durante la simulación y mostrada mediante el monitor serial.

Etapa 3. Implementación del circuito virtual: Una vez desarrollado el algoritmo, se construyó el circuito electrónico en la plataforma Wokwi mediante la interconexión de todos los componentes definidos en la etapa de diseño. Posteriormente, se verificó la correcta alimentación eléctrica de cada dispositivo, así como la correspondencia entre las conexiones físicas y los pines definidos en el programa.

Etapa 4. Simulación del sistema: El funcionamiento del prototipo fue evaluado mediante diferentes escenarios de operación modificando los valores de temperatura y humedad disponibles en la plataforma Wokwi. Durante la simulación se verificó la respuesta del sistema frente a las variaciones de temperatura, observando la activación del módulo relé, el LED indicador y el servomotor según los umbrales establecidos en el algoritmo de control.

Asimismo, se registraron las lecturas mostradas en el monitor serial para comprobar el correcto monitoreo de las variables ambientales y el comportamiento del sistema durante cada condición evaluada.

Etapa 5. Análisis de resultados: Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos durante la simulación, verificando el cumplimiento de la lógica de control implementada y el funcionamiento coordinado de los diferentes componentes electrónicos. Los datos registrados permitieron comprobar que el sistema respondió de acuerdo con las variaciones de temperatura programadas y que el monitoreo de la humedad relativa se realizó de forma continua durante el proceso de simulación.

E. Análisis Preliminar Del Mercado Y Usuarios Potenciales: El mercado potencial de la propuesta está relacionado con pequeños productores, asociaciones y organizaciones cafetaleras que realizan el proceso de secado del café pergamino y requieren un mayor control de las condiciones ambientales durante esta etapa.

Para establecer una primera aproximación a los posibles usuarios, se consideraron antecedentes desarrollados en la zona cafetalera de Cajamarca que evidencian la aplicación de soluciones tecnológicas en actividades relacionadas con la producción de café.

En San Ignacio, García Hernández et al. [6] desarrollaron y evaluaron una aplicación web para la detección de enfermedades en plantas de café, trabajando con una muestra de 25 productores. El estudio aplicó una evaluación antes y después de un periodo de prueba y reportó un incremento del 20 % en la consideración de los agricultores sobre la importancia de la salud de las plantas para una producción sostenible [6]. Este antecedente resulta relevante para la presente propuesta debido a que demuestra la participación de productores de San Ignacio en procesos de evaluación de herramientas tecnológicas aplicadas a la actividad cafetalera.

Asimismo, Huancas Segura y Suárez Jiménez [7] analizaron el perfil de 209 productores pertenecientes a la Cooperativa Coopagro Perú, en Jaén, Cajamarca. El estudio identificó que la

mayoría de los productores trabajaba con superficies relativamente pequeñas y reportó dificultades relacionadas con la calidad del producto y el acceso al financiamiento [7]. Estas características deben ser consideradas para una eventual implementación del sistema, debido a que una solución dirigida a pequeños productores tendría que mantener costos de adquisición, operación y mantenimiento compatibles con sus condiciones productivas.

A partir de estos antecedentes, se identifica como usuario potencial al productor o grupo de productores que realiza el secado del café pergamino y que busca controlar de manera más constante variables como la temperatura y la humedad relativa. La propuesta de valor del sistema estaría relacionada con la automatización de determinadas acciones de control mediante componentes electrónicos de bajo costo, permitiendo monitorear las condiciones del proceso y activar los mecanismos de calefacción o ventilación de acuerdo con los parámetros establecidos.

Sin embargo, los antecedentes revisados no permiten determinar por sí solos la aceptación comercial del sistema, el precio que los productores estarían dispuestos a pagar ni la rentabilidad de una eventual implementación. Por esta razón, como parte de la validación empresarial futura, se propone realizar entrevistas o encuestas a productores de San Ignacio y organizaciones cafetaleras de la zona para identificar sus necesidades, nivel de interés, capacidad de inversión, condiciones disponibles para la instalación y principales dificultades relacionadas con el secado del café.

De manera complementaria, la validación deberá considerar el costo de construcción del prototipo físico, el consumo energético, los costos de mantenimiento y la percepción de utilidad por parte de los usuarios. Estos aspectos permitirán determinar si la solución puede ser económicamente accesible y si existe una necesidad suficientemente clara para justificar su implementación. Por tanto, la presente investigación establece una primera aproximación al mercado objetivo y deja planteadas las variables que deberán ser evaluadas posteriormente mediante pruebas con usuarios y un prototipo físico en condiciones reales.

III.RESULTADOS

Con el propósito de verificar el funcionamiento del sistema automatizado propuesto, se realizaron pruebas de simulación en la plataforma Wokwi bajo diferentes condiciones de temperatura. Durante estas pruebas se evaluó el comportamiento del algoritmo implementado en Arduino, verificando la respuesta del módulo relé, el servomotor y el LED indicador, además del monitoreo continuo de la temperatura y la humedad relativa mediante el sensor DHT22.

A. Evaluación del algoritmo de control: Con la finalidad de evaluar la lógica de control implementada, se establecieron tres escenarios de prueba variando la temperatura registrada por el sensor DHT22. Para cada condición se observó la respuesta de los actuadores y el estado general del sistema automatizado. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla II.

TABLA II.
RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS DE SIMULACIÓN

Escenario	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Relé	Servomotor	LED	Estado del sistema
1	28	70	Activado	0°	Encendido	Calefacción
2	32	65	Desactivado	0°	Apagado	Operación normal
3	37	60	Desactivado	90°	Apagado	Ventilación

Los resultados muestran que el algoritmo ejecutó las acciones establecidas de acuerdo con los umbrales programados. Cuando la temperatura fue inferior a 30 °C, el sistema activó el módulo relé y el LED indicador, simulando el funcionamiento del sistema de calefacción. En el intervalo comprendido entre 30 °C y 35 °C, los actuadores permanecieron desactivados. Finalmente, cuando la temperatura superó los 35 °C, el servomotor giró hasta una posición de 90°, representando la apertura del mecanismo de ventilación propuesto.

B. Respuesta de los componentes electrónicos: La evaluación de los componentes electrónicos se realizó durante las pruebas de simulación, observando el funcionamiento individual y la interacción de los dispositivos que conforman el sistema. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla III.

TABLA III.
RESPUESTA DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Componente	Condición evaluada	Respuesta obtenida
Sensor DHT22	Monitoreo continuo	Registro correcto de temperatura y humedad
Arduino Uno	Procesamiento de datos	Ejecución correcta del algoritmo de control
Módulo relé	Temperatura < 30 °C	Activación correcta
LED indicador	Activación del relé	Encendido correcto
Servomotor	Temperatura > 35 °C	Giro hasta 90°
Monitor serial	Funcionamiento continuo	Visualización permanente de las variables ambientales

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla III,

los componentes del sistema ejecutaron las funciones establecidas durante la simulación. El sensor DHT22 proporcionó las lecturas ambientales requeridas para la toma de decisiones del algoritmo, mientras que el Arduino Uno ejecutó correctamente la lógica de control programada. Asimismo, el módulo relé, el servomotor y el LED indicador realizaron las acciones correspondientes según los umbrales de temperatura establecidos.

La respuesta observada permitió comprobar la interacción entre los diferentes componentes electrónicos dentro del entorno virtual y verificar que las conexiones y funciones programadas se encontraban coordinadas de acuerdo con la lógica propuesta.

c. *Monitoreo de las variables ambientales:* Durante la ejecución de las pruebas, el monitor serial permitió visualizar los valores de temperatura y humedad relativa registrados por el sensor DHT22. La Figura 4 presenta un ejemplo de las lecturas obtenidas durante la simulación.

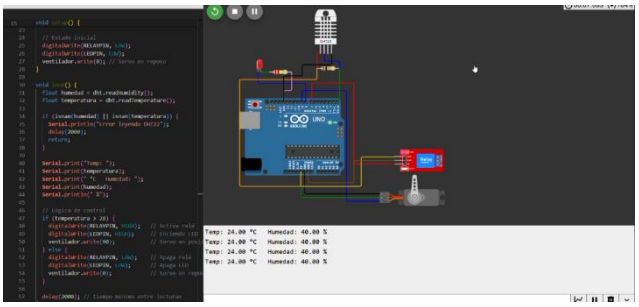


Fig. 4. Monitor serial del sistema automatizado durante la simulación.

El monitor serial mostró de manera continua los valores de temperatura y humedad relativa medidos por el sensor DHT22. Estas lecturas permitieron comprobar el correcto intercambio de información entre el sensor y el microcontrolador, así como observar la ejecución del algoritmo de control durante el funcionamiento del sistema.

En conjunto, los resultados obtenidos permitieron comprobar el funcionamiento de la lógica de control y la interacción de los componentes electrónicos dentro del entorno de simulación. Sin embargo, estos resultados corresponden exclusivamente a la evaluación virtual del sistema y no representan mediciones de desempeño obtenidas bajo condiciones reales de secado del café pergamino.

IV.DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que el algoritmo de control implementado permitió gestionar las acciones del sistema de acuerdo con las condiciones de temperatura establecidas. La activación del módulo relé cuando la temperatura fue inferior a 30 °C y el accionamiento del servomotor al superar los 35 °C evidencian que la integración entre el sensor DHT22, el Arduino Uno y los actuadores permitió establecer una respuesta automática frente a las variaciones de las condiciones ambientales. Esto resulta relevante para el proceso de secado del café pergamino, debido a que permite plantear una estrategia de monitoreo continuo y reducir la dependencia de la supervisión manual.

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado por Guevara-Sánchez et al. [2], quienes demostraron que las condiciones de secado influyen directamente sobre la calidad física y sensorial del café pergamino. En ambos estudios se reconoce la importancia del control de las condiciones durante esta etapa de poscosecha. Sin embargo, mientras Guevara-Sánchez et al. [2] analizaron experimentalmente el efecto de las condiciones de secado sobre la calidad del café, la presente investigación se orientó al desarrollo de una solución automatizada para el monitoreo y control de variables ambientales. Esta diferencia permite complementar ambos enfoques, ya que el control automatizado de las condiciones del proceso puede constituir una herramienta para futuras investigaciones orientadas a evaluar su influencia sobre la calidad final del producto.

Asimismo, Barzola-Cárdenas et al. [4] desarrollaron un secador solar automatizado para café pergamino en la provincia de Jaén, utilizando sensores y modelos matemáticos para estimar la humedad del producto. Los resultados de ambas investigaciones coinciden en la importancia de incorporar sistemas de medición y automatización para mejorar el seguimiento de las condiciones presentes durante el secado. La propuesta desarrollada en el presente trabajo incorpora una estrategia de control basada en umbrales de temperatura, mediante la cual se determina la activación de los mecanismos de calefacción y ventilación. Esta característica permite plantear una arquitectura sencilla que puede ser adaptada posteriormente a las necesidades de pequeños productores cafetaleros.

En relación con el sistema de ventilación, Prada et al. [5] reportaron que la incorporación de un flujo continuo de aire impulsado mediante energía fotovoltaica permitió favorecer el proceso de secado del café. En la presente investigación, el accionamiento automático del servomotor cuando la temperatura supera el umbral establecido representa una estrategia orientada a regular las condiciones internas de la cámara. Aunque no se determinó experimentalmente la eficiencia del flujo de aire generado por el sistema propuesto, la incorporación de un mecanismo de ventilación controlado permite establecer una base para futuras evaluaciones relacionadas con la uniformidad del secado y el tiempo

requerido para alcanzar el contenido de humedad deseado.

Desde el punto de vista de la automatización, la utilización de Arduino como unidad de control permitió integrar el sensor DHT22, el módulo relé, el servomotor y el LED indicador mediante una arquitectura sencilla y de bajo costo. Estos resultados guardan relación con lo reportado por Ascencios et al. [8] y Condori Tijera et al. [9], quienes destacan la aplicación de plataformas basadas en Arduino para el monitoreo y automatización de procesos agrícolas. La flexibilidad de estas plataformas facilita la incorporación de sensores y actuadores de acuerdo con las necesidades de cada aplicación. En el caso del presente sistema, esta característica permitió integrar el monitoreo de temperatura y humedad relativa con acciones automáticas de calefacción, ventilación y señalización.

De manera complementaria, Campos et al. [10] plantearon una propuesta basada en dispositivos IoT para la gestión del cultivo de café, destacando la utilidad de los sensores para obtener información en tiempo real y apoyar las decisiones relacionadas con el manejo del cultivo. Esta perspectiva coincide con la propuesta desarrollada, en la cual el monitoreo continuo de variables ambientales constituye el punto de partida para ejecutar acciones automáticas. La principal diferencia se encuentra en la etapa del proceso abordada: mientras el trabajo citado se orienta a la gestión del cultivo, el presente estudio se concentra específicamente en la etapa de secado del café pergamino.

Un aspecto relevante para una futura implementación es el consumo energético del sistema, particularmente por la utilización de una resistencia calefactora. La estrategia de control propuesta activa este elemento únicamente cuando la temperatura desciende por debajo del umbral establecido, lo que plantea un funcionamiento intermitente en lugar de una operación permanente. Sin embargo, el consumo real dependerá de factores como la potencia de la resistencia, el aislamiento de la estructura, las condiciones ambientales y el tiempo requerido para mantener la temperatura dentro del rango establecido. Por ello, estos parámetros deberán ser considerados en una futura evaluación técnica y económica del sistema.

Por otra parte, el funcionamiento del sistema está condicionado por las características físicas de la cámara de secado y por las condiciones ambientales del lugar donde sea implementado. Factores como la transferencia de calor, la distribución del flujo de aire, la temperatura exterior y la pérdida progresiva de humedad del café pueden modificar el comportamiento observado durante las pruebas. En consecuencia, la construcción de un prototipo permitirá determinar cómo interactúan estos factores y establecer los parámetros de operación que mejor se adapten a las condiciones de los productores de San Ignacio.

Desde una perspectiva de aplicación, la propuesta presenta características que pueden resultar de interés para pequeñas unidades productivas, debido al uso de componentes electrónicos disponibles y a una arquitectura que puede ampliarse según los requerimientos del usuario. La incorporación de un sistema de monitoreo y control podría facilitar la supervisión del proceso y disminuir la necesidad de intervención constante. No obstante, para determinar su utilidad práctica será necesario considerar también aspectos relacionados con el costo de construcción, mantenimiento, consumo energético y facilidad de operación.

En este sentido, la validación futura deberá integrar tanto los aspectos técnicos como las características de los posibles usuarios. Además de evaluar variables como el tiempo de secado, estabilidad de la temperatura, humedad del producto y consumo energético, será importante conocer la percepción de los productores respecto al sistema, sus necesidades durante el proceso de secado y las condiciones económicas para una eventual adquisición.

Esta evaluación permitirá determinar con mayor precisión el potencial de implementación de la propuesta y establecer las condiciones necesarias para una posible transferencia tecnológica hacia pequeños productores y organizaciones cafetaleras de San Ignacio.

Finalmente, los resultados obtenidos constituyen una base para continuar con el desarrollo del sistema automatizado y evaluar su comportamiento en condiciones reales. La siguiente etapa permitirá relacionar el funcionamiento del sistema con indicadores propios del proceso de secado y con las necesidades de los productores, generando información técnica y económica que contribuya a determinar su factibilidad de implementación.

V. CONCLUSIONES

1. Se cumplió el objetivo de diseñar y evaluar, mediante simulación en la plataforma Wokwi, un sistema automatizado basado en Arduino para el monitoreo y control de la temperatura durante el proceso de secado de café pergamino. La evaluación permitió comprobar el funcionamiento de la lógica de

control y la interacción entre el sensor DHT22, el módulo relé, el servomotor y el LED indicador frente a los diferentes escenarios de temperatura establecidos.

2. La evaluación del sistema permitió comprobar que el algoritmo desarrollado respondió de acuerdo con las variaciones de temperatura programadas, activando los actuadores según los umbrales establecidos. Cuando la temperatura fue inferior a 30 °C se activaron el módulo relé y el LED indicador, mientras que al superar los 35 °C se accionó el servomotor hasta una posición de 90°, representando las funciones de calefacción y ventilación planteadas para el sistema.

3. El empleo de la plataforma Wokwi permitió verificar previamente el comportamiento del sistema y realizar ajustes en la programación antes de una posible implementación física. Asimismo, facilitó la comprobación de las conexiones y la interacción entre los componentes electrónicos, constituyéndose en una herramienta útil para la etapa inicial de desarrollo de una solución automatizada aplicada al proceso de secado del café.

4. La propuesta establece una base tecnológica para la automatización del monitoreo y control de las condiciones de secado del café pergamino, con potencial de aplicación en pequeñas unidades productivas de San Ignacio. Sin embargo, para determinar su desempeño y factibilidad de implementación será necesario desarrollar posteriormente un prototipo físico y realizar una validación técnica y empresarial que considere aspectos como el tiempo de secado, estabilidad de la temperatura, consumo energético, costos de implementación y percepción de los productores.

REFERENCIAS

[1] International Coffee Organization (ICO), Coffee Development Report 2023: Beyond Coffee—Towards a Circular Coffee Economy. London, United Kingdom, 2023. Disponible: https://www.internationalcoffee.org/

[2] M. Guevara-Sánchez, C. Bernales del Águila, J. Saavedra-Ramírez y J. Owaki-López, "Efecto de la altitud en la calidad del café (Coffea arabica L.): comparación entre secado mecánico y tradicional", Scientia Agropecuaria, vol. 10, no. 4, pp. 505-510, 2019. Disponible: https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.07

[3] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), Observatorio del Café Peruano. Disponible: https://observatorio.midagri.gob.pe/

[4] A. Barzola-Cárdenas, L. Quiñones-Huatangari, B. Vásquez-Ochoa, I. Pérez-Guevara, y M. Díaz-Torres, "Estimación de humedad de café pergamino utilizando un secador solar automatizado mediante modelos matemáticos en Jaén, Perú", Tecnia, vol. 30, núm. 1, 2020. Disponible: https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.824

[5] A. Prada, C. Vela, G. Bardález, y J. Saavedra, "Efectividad de un proceso de secado de café usando secadores solares con sistema de flujo de aire continúo impulsado por energía fotovoltaica en la región San Martín, Perú", Información Tecnológica, vol. 30, núm. 6, págs. 149–156, 2019. Disponible: https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600015

[6] J. P. Garcia-Hernandez, J. C. Rafael-Arbildo, J. A. Meza-Huamán, D. A. Pérez-Aguilar, D. E. Alvarado-León, and M. E. Malpica-Rodríguez, "Plant health: Web application for detecting diseases in coffee plants in northern Peru," in *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 2024. Disponible: https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/papers/Contribution_623_final_a.pdf

[7] A. F. Huancas Segura and J. K. Suárez Jiménez, "Perfil de los productores de café para la exportación en la 'Cooperativa Coopagro Perú' en Jaén, Cajamarca 2024," in *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, vol. 2, no. 11, 2024. Disponible: https://laccei.org/LEIRD2024-VirtualEdition/meta/FP421.htmllaccei

[8] D. Ascencios, K. Meza, J. Lluen, y G. Simon, "Calibración, validación y automatización del sistema de riego por goteo subterráneo usando un microcontrolador Arduino", *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 22, núm. 1, págs. 95–108, 2020. Disponible: https://doi.org/10.18271/ria.2020.540repositorio.unsch.edu

[9] R. Condori Tijera, H. Hinostroza Farfán, y JL Huayanay Villar, "Implementación de un sistema con Arduino para el monitoreo de magnitudes físicas del crecimiento de un cultivo agrícola", Revista Investigación (UNSCH) , vol. 28, núm. 1, págs. 11–21, 2020. Disponible: http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/4115icocoffee

[10] O. Campos, A. Rojas y R. Echandi, "Innovative Proposal for the Coffee Management of the Orozco Farm Using Devices from the Internet of Things (IOT)," LACCEI, 2024. Disponible: https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1957