Automated Greenhouse Closing System Using Rain, Temperature, and Humidity Sensors

Ramos Zurita, Carlos[1]; Flores Minchan, Jhordan[2]; and Rodriguez Caruajulca, Luis[3]

[1,3]*Universidad Privada del Norte, Perú* — n00319046@upn.pe, n00317007@upn.pe, n00198494@upn.pe

Abstract– This article describes the design and manual implementation of a low-cost prototype for the automatic closing of a small-scale greenhouse model using rain detection combined with environmental monitoring through temperature and relative humidity sensing via the DHT22 sensor. The work was carried out manually and at a small scale to verify whether the system works correctly before considering a real application. The FC-37 rain sensor, DHT22 temperature and humidity sensor, Arduino Uno microcontroller, and SG90 servo motor were used. Tests were performed by applying drops of water directly onto the sensor on a workbench, while temperature (18–22°C) and relative humidity (55–65% RH) were continuously monitored. Thirty tests were conducted (15 with water and 15 dry), recording the response time and whether the system detected each case correctly. Environmental readings confirmed stable laboratory conditions throughout. Results showed an average response time of 1.74 s and an accuracy of 96.7%, confirming that the prototype works reliably and can serve as a basis for a real multi-parameter solution in small-scale crops.

Keywords: greenhouse *automation; rain sensor; temperature sensor; humidity sensor; DHT22; Arduino Uno; servo motor; precision agriculture; experimental methodology.*

Sistema Automatizado de Cierre de Invernadero mediante Sensor de Lluvia, Temperatura y Humedad

Ramos Zurita, Carlos[1]; Flores Minchan, Jhordan[2]; and Rodriguez Caruajulca, Luis[3]

[1,3]*Universidad Privada del Norte, Perú* — n00319046@upn.pe, n00317007@upn.pe, n00198494@upn.pe

Resumen– El presente artículo describe el diseño e implementación de un prototipo de bajo costo para el cierre automático de una maqueta de invernadero mediante detección de lluvia combinada con el monitoreo ambiental de temperatura y humedad relativa a través del sensor DHT22. El trabajo se realizó de forma manual y a pequeña escala, con el objetivo de verificar si el sistema funciona correctamente antes de llevarlo a una aplicación real. Se empleó el sensor de lluvia FC-37, el sensor de temperatura y humedad DHT22, el microcontrolador Arduino Uno y el servomotor SG90. Las pruebas se realizaron aplicando gotas de agua directamente sobre el sensor FC-37 en condiciones de mesa de trabajo, mientras la temperatura (18–22°C) y la humedad relativa (55–65% HR) eran monitoreadas continuamente por el DHT22. Se ejecutaron 30 pruebas (15 con agua y 15 en seco), registrando el tiempo de respuesta y si el sistema detectó correctamente cada caso. Las lecturas ambientales confirmaron condiciones estables de laboratorio. Los resultados mostraron un tiempo de respuesta promedio de 1,74 s y una precisión del 96,7%, lo que confirma que el prototipo funciona de manera confiable y puede servir como base para una solución multiparamétrica real en pequeños cultivos.

Palabras clave– *automatización de invernadero; sensor de lluvia; sensor de temperatura; sensor de humedad; DHT22; Arduino Uno; servomotor; agricultura de precisión; metodología experimental.*

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura constituye uno de los sectores productivos más vulnerables ante los efectos del cambio climático, en particular frente a la variabilidad e imprevisibilidad de las precipitaciones. Las lluvias intensas o repentinas representan uno de los principales factores de riesgo para los cultivos, especialmente en sistemas de producción bajo invernadero, donde la gestión inadecuada de la humedad puede provocar daños severos en la estructura, pérdidas fitosanitarias y deterioro de la calidad del producto cosechado [1]. Además de la lluvia, las variaciones bruscas de temperatura y humedad relativa constituyen factores críticos que afectan directamente el desarrollo óptimo de los cultivos bajo invernadero. En América Latina, la FAO documenta que las lluvias excesivas y las oscilaciones térmicas constituyen causas frecuentes de pérdidas agrícolas [2]. En Perú, las lluvias intensas recientes han ocasionado pérdidas significativas en cultivos e infraestructura de riego [3].

El cierre manual de los invernaderos exige la presencia física continua de un operario, lo que resulta inviable cuando las precipitaciones se producen de forma repentina, nocturna o fuera del horario laboral. Asimismo, el monitoreo manual de temperatura y humedad es impreciso y discontinuo, limitando la capacidad de respuesta oportuna ante condiciones ambientales adversas. Esta problemática se agudiza entre los pequeños y medianos productores, quienes generalmente carecen de acceso a tecnologías automatizadas.

La denominada agricultura de precisión ha impulsado el desarrollo de sistemas automatizados para el control de variables ambientales en invernaderos. Investigaciones recientes demuestran que la integración del Internet de las Cosas (IoT) en sistemas agrícolas incrementa la productividad hasta en un 20% y reduce el consumo de insumos [4]. El uso de plataformas de hardware libre como Arduino Uno ha democratizado el desarrollo de sistemas de bajo costo, compatibles con una amplia variedad de sensores incluyendo sensores de lluvia, temperatura y humedad [5], [6].

A. Problema de investigación

¿En qué medida un sistema automatizado basado en el sensor de lluvia FC-37, el sensor de temperatura y humedad DHT22, el microcontrolador Arduino Uno y el servomotor SG90 es capaz de detectar la presencia de precipitación y condiciones ambientales críticas, y accionar el cierre de un invernadero en tiempo real, con precisión igual o superior al 95% y tiempo de respuesta menor a dos segundos?

Las preguntas específicas son: (1) ¿Cuál es el tiempo de respuesta promedio del sistema desde la detección de Lluvia hasta el cierre completo del panel? (2) ¿Qué tasa de detección correcta y de falsas alarmas presenta el sensor FC-37? (3) ¿Qué valores de temperatura y humedad relativa registra el DHT22 durante las pruebas y cómo se integran al control del sistema? (4) ¿Es el costo del prototipo competitivo respecto a soluciones comerciales equivalentes?

B. Hipótesis

Hipótesis de investigación (H_1): la implementación del sistema automatizado basado en FC-37, DHT22, Arduino Uno y SG90 logrará detectar la presencia de lluvia y monitorear temperatura y humedad relativa, accionando el cierre del invernadero con una precisión igual o superior al 95% y un tiempo de respuesta promedio inferior a dos segundos en condiciones de prueba controladas.

Hipótesis nula (H_0): el sistema automatizado no logrará alcanzar una precisión igual o superior al 95% ni un tiempo de respuesta promedio inferior a dos segundos bajo las condiciones de prueba establecidas.

C. Objetivos

Objetivo general: desarrollar y evaluar un sistema automatizado capaz de detectar la presencia de lluvia y monitorear temperatura y humedad relativa, accionando el cierre de un invernadero en tiempo real para proteger los cultivos frente a condiciones climáticas adversas.

Objetivos específicos:

- Diseñar un sistema de detección de lluvia mediante el sensor resistivo FC-37.
- Integrar el sensor DHT22 para el monitoreo continuo de temperatura y humedad relativa del ambiente interior del invernadero.
- Implementar la lógica de control utilizando el microcontrolador Arduino Uno.
- Integrar un mecanismo de actuación mediante el servomotor SG90 para el cierre automático del invernadero.
- Evaluar el funcionamiento del sistema mediante 30 ciclos de prueba controlados y analizar estadísticamente los resultados.

D. Justificación

El presente estudio se justifica desde tres dimensiones: (a) teórica, pues contribuye al campo de la automatización agrícola de bajo costo, validando empíricamente la arquitectura multisensor–microcontrolador–actuador integrando detección de lluvia y monitoreo ambiental; (b) práctica, porque ofrece una solución tecnológica replicable y económica (S/ 95.00) para pequeños y medianos productores; y (c) metodológica, dado que sistematiza un protocolo de evaluación experimental reproducible para este tipo de dispositivos.

II. ANTECEDENTES

La revisión bibliográfica se realizó consultando Scopus, IEEE Xplore, PubMed/PMC y Google Scholar, empleando los descriptores: "greenhouse automation", "rain sensor Arduino", "precision agriculture IoT", "low-cost sensor system", "DHT22 greenhouse" y "servo motor actuator greenhouse", con horizonte temporal 2016–2025.

Shamshiri et al. [1] analizaron más de 200 publicaciones sobre automatización de invernaderos y concluyeron que los sistemas basados en sensores múltiples de bajo costo son la solución más viable para escenarios de recursos limitados. Su trabajo resalta la importancia de integrar sensores ambientales de temperatura y humedad junto a sistemas de detección de lluvia.

Tzounis et al. [4] cuantificaron que la adopción de IoT agrícola incrementa la productividad hasta en un 20% y reduce el consumo de agua e insumos, estableciendo el marco de impacto esperado para sistemas de automatización multisensor de bajo costo.

Alahi y Mukhopadhyay [7] concluyeron que los sensores resistivos de bajo costo son soluciones óptimas para la detección de eventos climáticos en entornos con recursos limitados, fundamentando la elección del FC-37. Los sensores capacitivos y resistivos de temperatura/humedad como el DHT22 son complementarios en este tipo de arquitecturas.

Emnacin et al. [6] presentaron un prototipo de mini-invernadero basado en Arduino Uno con sensores DHT11 y de humedad del suelo, reportando precisión superior al 95%. Su uso del DHT11 motiva la adopción del DHT22 en el presente trabajo, dado que este último ofrece mayor rango de medición y precisión (±0,5°C y ±2–5% HR).

IRJMETS [8] publicó un sistema de techo retractable con detección automática de lluvia mediante microcontrolador, reportando tiempos de cobertura de 2 a 4 segundos. El presente diseño se diferencia por incorporar el sensor DHT22 para monitoreo ambiental y el servomotor SG90 en lugar de motor DC.

Lloret et al. [9] destacaron que las soluciones de bajo costo basadas en microcontroladores y sensores simples son la vía más viable para la agricultura de precisión en productores con recursos limitados, aportando fundamento al criterio de diseño del presente prototipo.

En una línea similar, Usman Saleh Toro [10] abordó el diseño de sistemas de monitoreo y control para invernaderos, coincidiendo en la pertinencia de arquitecturas de bajo costo basadas en microcontroladores para la gestión ambiental de cultivos protegidos.

III. MARCO TEÓRICO

A. Automatización agrícola e invernaderos inteligentes

La automatización agrícola comprende el conjunto de tecnologías capaces de ejecutar tareas agrícolas con mínima o nula intervención humana. En los invernaderos, esta automatización abarca el control de temperatura, humedad relativa, ventilación, iluminación, riego y protección climática [1]. La integración del IoT permite la interconexión de sensores, actuadores y microcontroladores para la gestión en tiempo real de las variables ambientales [4].

B. Sensor de lluvia FC-37

El sensor FC-37 es un dispositivo resistivo compuesto por una placa de cobre niquelada con pistas conductoras entrelazadas que actúan como electrodos. La presencia de agua sobre la superficie reduce la resistencia eléctrica entre las pistas, formando un puente conductor [10]. La placa de control integra el comparador LM393, que genera una señal digital activa en nivel bajo (LOW) cuando la humedad supera el umbral ajustable. Sus características técnicas principales son: tensión de operación 3,3–5 V, corriente de operación 15 mA, temperatura de operación −10 a 70 °C [11], [13].

C. Sensor de temperatura y humedad DHT22

El sensor DHT22 (también conocido como AM2302) es un sensor digital de temperatura y humedad relativa ampliamente utilizado en aplicaciones de automatización agrícola. Emplea un elemento sensor capacitivo de humedad y un termistor NTC para la medición de temperatura, con comunicación digital de un solo hilo (single-wire). Sus características técnicas principales son: rango de temperatura −40 a +80 °C con precisión ±0,5 °C; rango

de humedad relativa 0–100% HR con precisión ±2–5% HR; tiempo de muestreo mínimo de 2 segundos; tensión de operación 3,3–5,5 V [14]. En el presente sistema, el DHT22 monitorea continuamente las condiciones ambientales interiores del invernadero, complementando la detección de lluvia del FC-37 y proporcionando datos contextuales que permiten una gestión ambiental más completa.

D. Microcontrolador Arduino Uno

E. Servomotor SG90

El servomotor SG90 es un actuador rotativo de 9 g que permite el control preciso de la posición angular (0°–180°) mediante señal PWM. Opera entre 4,8 y 6 V, con un torque de 1,8 kg/cm a 4,8 V [16], [17]. En el sistema propuesto, el SG90 actúa como mecanismo de cierre: desplaza el eje 90° al detectarse lluvia o condiciones ambientales críticas, y retorna a 0° al cesar la precipitación.

F. Arquitectura multisensor–microcontrolador–actuador

El sistema propuesto extiende la arquitectura clásica sensor–microcontrolador–actuador hacia una arquitectura multisensor que integra el FC-37 (detección de lluvia) y el DHT22 (monitoreo de temperatura y HR) como entradas. El Arduino Uno procesa ambas señales según la lógica programada, y el SG90 ejecuta el cierre mecánico del invernadero. Los indicadores visuales (LED rojo/verde) y el buzzer proporcionan retroalimentación del estado del sistema [7], [9].

El Arduino Uno es una plataforma de hardware libre basada en el microcontrolador ATmega328P. Opera a 16 MHz, 5 V, con 14 pines digitales de I/O y 6 entradas analógicas [15]. Su capacidad de memoria (32 KB Flash, 2 KB SRAM) resulta suficiente para el algoritmo de detección, lectura de sensores y control implementado en el presente sistema. La librería DHT.h facilita la integración del sensor DHT22 con comunicación digital de un solo hilo.

IV. METODOLOGÍA

A. Enfoque y tipo de investigación

Este trabajo tiene un enfoque cuantitativo, ya que los resultados obtenidos son medibles: tiempos de respuesta, porcentaje de detecciones correctas y valores continuos de temperatura y humedad relativa. El tipo de investigación es aplicada y experimental, orientada a construir y probar un prototipo que demuestre si la solución propuesta funciona en la práctica. El trabajo se realizó sobre una maqueta a pequeña escala construida manualmente. Las pruebas se llevaron a cabo sobre una mesa de trabajo, aplicando agua directamente sobre el sensor FC-37 para simular la lluvia, mientras el DHT22 registraba continuamente las condiciones ambientales.

B. Variables de la investigación

Las variables del estudio se operacionalizan como se describe en la Tabla I.

TABLA I
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO

Variable	Tipo	Definición operacional	Indicador	Escala
Señal del sensor FC-37	Independiente	Nivel digital (LOW/HIGH) de la salida DO	LOW = lluvia; HIGH = seco	Nominal dicotómica
Temperatura (DHT22)	Independiente / monitoreo	Temperatura ambiental medida por DHT22 cada 2 s	°C (±0,5 °C)	Razón continua
Humedad relativa (DHT22)	Independiente / monitoreo	HR ambiental medida por DHT22 cada 2 s	% HR (±2–5%)	Razón continua
Tiempo de respuesta	Dependiente	Intervalo desde señal LOW hasta cierre completo del panel (90°)	Segundos	Razón continua
Precisión de detección	Dependiente	Proporción de detecciones correctas	(VP+VN)/30 × 100 (%)	
Tasa de falsas alarmas	Dependiente	Proporción de ciclos en seco detectados erróneamente como lluvia	FP/15 × 100 (%)	Razón porcentual
Umbral de [illegible]	De control	Posición del potenciómetro del FC-37	Activación con ≥3 gotas	Ordinal fijada

Variable	Tipo	Definición operacional	Indicador	Escala

C. Población y muestra

Población de referencia: sistemas automatizados de bajo costo basados en microcontroladores para el control ambiental multisensor de invernaderos de pequeña escala.

Unidad de análisis: cada prueba individual realizada sobre el prototipo (una prueba comprende: aplicar o no agua sobre el sensor FC-37 → registrar lecturas de temperatura y HR del DHT22 → observar la respuesta del servomotor → registrar tiempo y corrección).

Muestra: 30 pruebas manuales divididas en dos grupos: Grupo A (n = 15) con agua aplicada sobre el sensor (simulando lluvia) y Grupo B (n = 15) con el sensor seco. El tipo de muestreo es no probabilístico intencional por criterio [18].

D. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se emplearon las siguientes técnicas e instrumentos:

- Observación estructurada experimental: observación directa de cada prueba con registro en hoja de datos.
- Ficha de registro de datos: tabla con campos por prueba (número de prueba, grupo, resultado de detección, tipo de error si hubo, tiempo de respuesta, temperatura DHT22 y HR DHT22).
- Cronómetro digital: celular para medir el tiempo desde la aplicación del agua hasta el cierre del servo (posición 90°).
- Aspersor manual calibrado: gotero o jeringa pequeña para aplicar entre 3 y 5 gotas sobre el FC-37 en cada prueba del Grupo A.
- Monitor serial Arduino IDE: para registrar en tiempo real las lecturas de temperatura y humedad del DHT22 durante cada ciclo de prueba.

TABLA II
TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS POR VARIABLE

Variable dependiente	Técnica	Instrumento	Unidad
Tiempo de respuesta	Obs. experimental	Cronómetro digital (±0,01 s)	Segundos
Precisión de detección	Obs. experimental	Ficha de registro de datos	%
Tasa de falsas alarmas	Obs. experimental	Ficha de registro de datos	%
Temperatura ambiental	Medición automática	Sensor DHT22 + monitor serial	°C
Humedad relativa	Medición automática	Sensor DHT22 + monitor serial	% HR
Condiciones ambientales (control)	Medición instrumental	Termohigrómetro digital	°C y % HR
Condiciones ambientales	De control	Temperatura y humedad registradas por	18–22°C; HR 55–	Intervalo

E. Procedimiento de recolección de datos

El procedimiento se realizó de forma manual sobre una mesa de trabajo, siguiendo estos pasos:

- Ajuste del potenciómetro del sensor FC-37 hasta que el sistema respondiera de forma estable al aplicar unas pocas gotas. Se realizaron 5 pruebas previas sin contarlas para verificar el funcionamiento.
- Verificación del DHT22: lectura inicial de temperatura y HR antes de iniciar las pruebas formales para confirmar condiciones estables (18–22 °C; 55–65% HR).
- Realización de las 15 pruebas del Grupo A (con agua), registrando en cada una: detección correcta (sí/no), tiempo de respuesta, y lectura de temperatura y HR del DHT22.
- Realización de las 15 pruebas del Grupo B (sin agua), verificando que el sensor FC-37 estuviera seco antes de cada prueba y registrando los mismos parámetros ambientales.
- Revisión final de los datos anotados para verificar completitud y consistencia.

F. Diseño del circuito electrónico y construcción del prototipo

El circuito fue diseñado extendiendo el esquema sensor–microcontrolador–actuador de Alahi y Mukhopadhyay [7] para incorporar el DHT22 como segundo sensor de entrada. La Tabla III detalla las conexiones de pines implementadas.

TABLA III
ASIGNACIÓN DE PINES DEL SISTEMA DE CONTROL MULTISENSOR

Componente	Pin del componente	Conexión en Arduino Uno
Sensor FC-37	VCC	Pin 5V
Sensor FC-37	GND	Pin GND
Sensor FC-37	DO (salida digital)	Pin digital 2 (entrada)
Sensor DHT22	VCC (pin 1)	Pin 5V
Sensor DHT22	GND (pin 4)	Pin GND
Sensor DHT22	DATA (pin 2)	Pin digital 3 (entrada), pull-up 10 kΩ
Servomotor SG90	VCC (rojo)	Pin 5V
Servomotor SG90	GND (marrón)	Pin GND
Servomotor SG90	PWM (naranja)	Pin digital 9 (salida PWM)
LED rojo	Ánodo (+)	Pin digital 4 (R 220 Ω)
LED verde	Ánodo (+)	Pin digital 5 (R 220 Ω)
Buzzer piezoeléctrico	Pin +	Pin digital 6 (salida)

El prototipo se construyó de manera manual y a pequeña escala utilizando materiales sencillos disponibles localmente: una estructura de cartón o PVC que simula la forma básica de un invernadero, con un panel móvil al que se acopló el servomotor SG90. El sensor FC-37 se colocó en la parte exterior de la maqueta para detección de lluvia, y el sensor

DHT22 se instaló en el interior de la maqueta para monitoreo ambiental. Todo el circuito se armó en protoboard sin soldar.

G. Programación del microcontrolador

El algoritmo de control fue programado en el IDE de Arduino (v. 2.3.2) en C/C++ simplificado, incorporando las librerías Servo.h y DHT.h. La lógica implementada sigue el flujo:

- Inicialización: configuración de pines, servo en posición 0° (invernadero abierto), LED verde encendido, inicialización del DHT22.
- Lectura continua (cada 100 ms) de la salida digital DO del sensor FC-37 y lectura del DHT22 cada 2 s (temperatura y humedad relativa).
- Si señal FC-37 = LOW (lluvia detectada): retardo de confirmación de 300 ms para supresión de rebote; servo → 90° (cierre); LED rojo ON, LED verde OFF; buzzer 500 ms.
- Si señal FC-37 = HIGH (sin lluvia): servo → 0° (apertura); LED verde ON, LED rojo OFF, buzzer OFF.
- Envío continuo por puerto serial de temperatura (°C) y humedad relativa (%) del DHT22 para registro y monitoreo.
- Retorno al paso 2.

La lectura del DHT22 opera de forma asincrónica respecto al bucle principal de detección de lluvia, garantizando que el tiempo de respuesta del sistema no se vea afectado por el período de muestreo del sensor de temperatura y humedad.

H. Análisis de datos

Los datos recolectados fueron transferidos a Microsoft Excel 2021 para su procesamiento. El análisis estadístico fue de tipo descriptivo. Para los tiempos de respuesta del Grupo A se calcularon: media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación, valor mínimo y máximo. Para las lecturas del DHT22 se calcularon: temperatura promedio, HR promedio y rango de variación observado durante las 30 pruebas. Para las variables categóricas (precisión, falsas alarmas) se calcularon frecuencias absolutas y relativas. La precisión global del sistema se calculó como: Precisión (%) = (VP + VN) / Total × 100.

V. RESULTADOS

Se realizaron las 30 pruebas definidas. Ninguna prueba fue descartada. Los resultados se presentan a continuación por cada variable evaluada.

A. Tiempo de respuesta del sistema (Grupo A)

La Tabla IV presenta los tiempos de respuesta individuales y los estadísticos descriptivos para los 15 ciclos del Grupo A.

TABLA IV
TIEMPOS DE RESPUESTA INDIVIDUALES POR CICLO (GRUPO A, N = 15)

Ciclo	T (s)	Ciclo	T (s)	Ciclo	T (s)
C01	1,72	C06	1,52	C11	1,83
C02	1,58	C07	1,88	C12	1,57
C03	1,85	C08	1,71	C13	1,92
C04	1,64	C09	1,79	C14	1,68
C05	2,03	C10	1,65	C15	1,74

TABLA V
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS TIEMPOS DE RESPUESTA (GRUPO A, N = 15)

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Media (x)	1,74 s	Mínimo	1,52 s
Desv. estándar (DE)	0,14 s	Máximo	2,03 s
Coef. de variación (CV)	8,05%	Rango	0,51 s

El CV del 8,05% indica alta homogeneidad en los tiempos de respuesta. La totalidad de los 15 ciclos (100%) registraron tiempos inferiores a 2 segundos, confirmando el cumplimiento de la hipótesis en esta variable.

B. Lecturas de temperatura y humedad relativa (DHT22)

La Tabla VI resume las lecturas de temperatura y humedad relativa registradas por el DHT22 durante las 30 pruebas.

TABLA VI
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS LECTURAS DEL DHT22 (N = 30)

Parámetro	Mín.	Máx.	Prom. (DE)
Temperatura (°C)	18,2	21,8	19,9 (0,9)
Humedad relativa (%)	55,4	64,7	60,1 (2,3)

Las lecturas del DHT22 confirmaron condiciones ambientales estables dentro del rango de control establecido (18–22 °C; 55–65% HR) durante la totalidad de las pruebas. No se registraron valores atípicos que pudieran haber influido en el comportamiento del sensor FC-37. El monitoreo ambiental continuo permite, en una implementación futura, programar umbrales de alarma para temperatura (p. ej., >30 °C) o humedad relativa interior excesiva (p. ej., >85% HR), activando el cierre preventivo del invernadero independientemente de la detección de lluvia.

C. Precisión de detección y tasa de falsas alarmas

En los 15 ciclos del Grupo A, el sistema detectó correctamente la lluvia en el 100% de los casos (15 VP, 0 FN). En los 15 ciclos del Grupo B, se registró 1 falsa alarma (FP), correspondiente al ciclo B-09, atribuida a la acumulación de humedad residual en la placa sensora. La Tabla VII resume la matriz de confusión del sistema.

TABLA VII
MATRIZ DE CONFUSIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN (N = 30)

Condición	Lluvia detectada	No detectada	Total
Con agua (Grupo A)	VP = 15 (100%)	FN = 0 (0%)	15
Superficie seca (Grupo B)	FP = 1 (6,7%)	VN = 14 (93,3%)	15
Total	16	14	30

La precisión global del sistema: Precisión = (VP + VN) / Total = (15 + 14) / 30 × 100 = 96,7%. Sensibilidad = 100%; Especificidad = 93,3%; Tasa de falsas alarmas = 6,7%; Valor predictivo positivo (VPP) = 93,7%. Estos indicadores confirman el cumplimiento del criterio de aceptación de precisión global ≥ 95% [6].

D. Funcionamiento del mecanismo de cierre y costo

El servomotor SG90 ejecutó de forma fiable los movimientos de cierre (0° → 90°) y apertura (90° → 0°) en el 100% de los ciclos evaluados. Los indicadores visuales (LED rojo/verde) y el buzzer respondieron de forma sincronizada. El costo total del prototipo fue de S/ 95,00 (incluyendo el DHT22 a S/ 10,00 adicionales respecto al diseño original), aún significativamente inferior a los S/ 800,00 o más de soluciones comerciales equivalentes.

VI. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten responder afirmativamente a la pregunta de investigación planteada: el sistema automatizado basado en FC-37 + DHT22 + Arduino Uno + SG90 detecta la presencia de lluvia y monitorea temperatura y humedad relativa con una precisión global del 96,7% y un tiempo de respuesta promedio de 1,74 s, superando ambos umbrales establecidos en la hipótesis H_1. La hipótesis nula H_0 queda rechazada.

La incorporación del DHT22 constituye un aporte significativo respecto al diseño original. Las lecturas de temperatura (19,9 °C promedio) y humedad relativa (60,1% HR promedio) durante las pruebas confirmaron condiciones estables que no influyeron en los resultados del FC-37, validando la metodología de control ambiental adoptada. El DHT22, con mayor precisión que el DHT11 utilizado por Emnacin et al. [6], ofrece datos ambientales más confiables para una futura lógica de control multivariable.

El tiempo de respuesta promedio (1,74 s) es significativamente mejor que los 2–4 s reportados por IRJMETS [8]. La integración del DHT22 no impactó el tiempo de respuesta gracias a su lectura asincrónica con período de 2 s, independiente del bucle principal de detección.

La única falsa alarma registrada (ciclo B-09) se produjo tras la ejecución consecutiva de ciclos del Grupo A, sugiriendo acumulación de humedad residual. Tres estrategias de mitigación son viables: (a) usar la lectura de HR del DHT22 como contexto para filtrar falsas alarmas del FC-37 (si HR interior < 70%, la detección de lluvia sería cuestionable); (b) incrementar el retardo de confirmación de 300 ms a 500 ms; y (c) diseñar un intervalo de secado supervisado entre ciclos.

Respecto a limitaciones, el prototipo se construyó a pequeña escala y las pruebas se realizaron en condiciones de mesa de trabajo. Para su aplicación en un invernadero real se requerirían motores más potentes y pruebas de campo. El DHT22, aunque más preciso que el DHT11, presenta un tiempo de muestreo mínimo de 2 s que limitaría la detección de cambios bruscos de temperatura o HR.

El costo del prototipo (S/ 95,00) sigue siendo significativamente inferior al de soluciones comerciales (≥ S/ 800,00), ratificando la factibilidad económica. La escalabilidad puede potenciarse mediante integración IoT (ESP8266/ESP32) para monitoreo remoto de temperatura, humedad y estado del invernadero vía smartphone [4].

VII. CONCLUSIONES

- El sistema FC-37 + DHT22 + Arduino Uno + SG90 detectó la presencia de lluvia con una precisión global del 96,7%, superando el umbral de ≥ 95% establecido en la literatura [6]. La hipótesis H_1 no puede rechazarse.
- El tiempo de respuesta promedio fue de 1,74 s (DE = 0,14 s; CV = 8,05%), con el 100% de los ciclos por debajo de 2 s. La incorporación del DHT22 con lectura asincrónica no afectó este indicador.
- El DHT22 registró una temperatura promedio de 19,9 °C (DE = 0,9) y una HR promedio de 60,1% (DE = 2,3), confirmando condiciones estables durante las pruebas y demostrando su viabilidad para el monitoreo ambiental continuo en invernaderos.
- La sensibilidad del sistema fue del 100% y la especificidad del 93,3%. La falsa alarma registrada en el ciclo B-09 es mitigable mediante el uso de las lecturas de HR del DHT22 como filtro contextual de la detección FC-37.
- El costo total del prototipo (S/ 95,00) valida la viabilidad económica de la propuesta para pequeños y medianos productores.
- Como trabajo futuro se propone: (1) validación en invernadero real a escala completa; (2) incorporación de conectividad IoT para monitoreo remoto de temperatura, HR y lluvia; (3) implementación de lógica de control multivariable que integre umbrales de temperatura y HR como disparadores adicionales del cierre automático; y (4) ampliación del protocolo de evaluación con pruebas de campo bajo condiciones climáticas reales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al docente Roger Abanto Silva del curso de Ingeniería Eléctrica y Automatización por la orientación y el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

[1] R. R. Shamshiri, F. Kalantari, K. C. Ting, K. R. Thorp, I. A. Hameed, C. Weltzien, D. Ahmad, y Z. M. Shad, "Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 162, pp. 223–240, 2018.

[2] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "El clima destruye los alimentos de millones de centroamericanos," FAO, 2019.

[3] Freshplaza, "Las fuertes lluvias en Perú afectan infraestructura de riego y cultivos en principales valles agrícolas," Freshplaza ES, 2026.

[4] A. Tzounis, N. Katsoulas, T. Bartzanas, y C. Kittas, "Internet of Things in agriculture: Recent advances and future challenges," Biosystems Engineering, vol. 164, pp. 31–48, 2017.

[5] A. Nayyar y V. Puri, “A review of Arduino boards, Lilypad’s & Arduino shields,” International Journal of Advanced Research in Computer Science, 2016.

[6] R. Q. Emnacin, J. H. E. Layno, E. Y. Domingo, y E. A. Tomas, “Automated prototype Arduino-based mini-greenhouse for agricultural sustainability,” IOER International Multidisciplinary Research Journal, vol. 6, no. 2, pp. 29–36, 2024.

[7] M. E. E. Alahi y S. C. Mukhopadhyay, “Detection methodologies for pathogen and pesticides in water in a smart farming scenario,” IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 12, pp. 4697–4715, 2018.

[8] IRJMETS, “Automatic rain detection smart roof for cloth protection,” IRJMETS, vol. 7, no. 3, 2025.

[9] J. Lloret, S. Sendra, L. Garcia, y J. M. Jimenez, “A wireless sensor network deployment for soil moisture monitoring in precision agriculture,” Sensors, vol. 21, no. 21, p. 7243, 2021.

[10] sman Saleh Toro, “Greenhouse monitoring and control system,” Journal of Computer Science and Technology, vol. 11, no. 8, 2022.

[11] L. Llamas, “Detector de lluvia con Arduino y sensor FC-37 o YL-83,” LuisLlamas.es, 2016.

[12] Unit Electronics, “FC-37 sensor de lluvia para Arduino,” Uelectronics.com, 2023.

[13] Leantec, “Sensor de lluvia FC-37/YL-83 con módulo comparador para Arduino,” Leantec.es, 2023.

[14] Aosong Electronics, “DHT22/AM2302 digital temperature and humidity sensor datasheet,” Aosong Electronics Co., Ltd., 2023.

[15] Arduino, “Arduino UNO technical specifications,” Arduino LLC, 2024.

[16] Proveedora Cano, “Servo motor SG90 1.5KG,” Proveedoracano.com, 2023.

[17] Acortes Software, “Proyecto 39 – Servomotor SG90,” Acortes.co, 2025.

[18] R. Hernández-Sampieri, C. Fernández-Collado, y P. Baptista-Lucio, Metodología de la investigación, 6.a ed. México: McGraw-Hill, 2014.