

Rudy Soler

1-COMPLEJO DE SOFTWARE Y HARDWARE -Article.pdf



Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:492004885

Fecha de entrega

4 sep 2025, 9:46 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

4 sep 2025, 9:59 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

1-COMPLEJO DE SOFTWARE Y HARDWARE -Article.pdf

Tamaño del archivo

2.8 MB

26 páginas

7637 palabras

43.487 caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 4% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	www.rcs.cic.ipn.mx	<1%
2	Trabajos entregados	Universidad EAN on 2025-04-12	<1%
3	Internet	www.coursehero.com	<1%
4	Internet	www.ecuadorexporta.org	<1%
5	Internet	www.gob.pe	<1%
6	Internet	sni.gob.cl	<1%
7	Internet	elderecho.com.co	<1%
8	Publicación	Rudy Medina, Bill Canaza, Angel Sullon, Muss Evgeny Ivanovich, Gladys Maquera. ...	<1%
9	Internet	sedici.unlp.edu.ar	<1%
10	Internet	revistas.ucv.edu.pe	<1%
11	Internet	www.senninger.biz	<1%

12	Internet	www.researchgate.net	<1%
13	Internet	www.vsf.es	<1%
14	Trabajos entregados	Corporación Universitaria Minuto de Dios, UNIMINUTO on 2024-07-24	<1%
15	Trabajos entregados	Universidad Nacional de Educación a Distancia on 2020-09-18	<1%
16	Internet	ciencialatina.org	<1%
17	Internet	dspace.espace.edu.ec	<1%
18	Internet	lectura.ilce.edu.mx:3000	<1%
19	Internet	open.umn.edu	<1%
20	Internet	patents.google.com	<1%
21	Internet	repositorio.lamolina.edu.pe	<1%
22	Internet	repositorio.unj.edu.pe	<1%
23	Trabajos entregados	uncedu on 2025-08-04	<1%
24	Internet	www.hacienda.gob.ni	<1%
25	Internet	www.sidalc.net	<1%

26

Internet

www.slideshare.net

<1%

27

Internet

www.tier1automation.com

<1%

CONTROL AUTOMATIZADO INTELIGENTE DEL ESTRÉS HÍDRICO Y TÉRMICO ABIÓTICO EN INVERNADEROS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PAPA PREBÁSICA

RUDY MEDINA^{ab}, BILL CANAZA^a, ANGEL SULLON^a, MUSS EVGENY IVANOVICH^c, GLADYS MAQUERA^a

^a Universidad Peruana Unión (UPEU), Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas, Juliaca, 21101, Lima, Perú.

^b Siberian Federal University (SibFU), Krasnoyarsk, 655360, Siberia, Rusia.

^c Krasnoyarsk State Agrarian University, (KrasGAU), Krasnoyarsk, 655360, Siberia, Rusia.

RESUMEN

El aumento proyectado del 50% en la demanda mundial de alimentos para 2050, junto con la disminución de la disponibilidad de agua dulce o cambio climático, resalta la necesidad urgente de prácticas agrícolas más eficientes. Este estudio presenta el desarrollo e implementación de un sistema automatizado de riego y control térmico de bajo costo para la producción de papa prebásica (*Solanum tuberosum* L.) en invernaderos en Siberia, Rusia. El sistema forma parte del proyecto DARY y se enfoca en optimizar el uso de agua y energía bajo condiciones controladas de estrés hídrico y térmico. Este experimento fue realizado durante dos temporadas consecutivas en 2024 y empleó sensores ambientales y algoritmos avanzados para regular dinámicamente el riego y la temperatura según las necesidades fisiológicas del cultivo. Se comparó con un sistema convencional en condiciones similares, evaluando costo operativo y funcionalidad del panel de control. Los resultados mostraron un incremento del 22% en la producción de papa prebásica, ahorro del 27% en agua y reducción del 12% en consumo eléctrico. Además, el costo del panel de control fue un 35% menor que el del sistema comercial, destacando su escalabilidad y adaptabilidad. La arquitectura del sistema incluye una aplicación web intuitiva, comunicación MQTT, base de datos NoSQL y microcontroladores. Los resultados validan a DARY como una solución tecnológica viable y sostenible para la agricultura de precisión, especialmente en contextos con donde los recursos tienen sus limitaciones.

Palabras clave: Agricultura sostenible; Algoritmos de control; Modelos de estrés; Monitoreo ambiental; Papa prebásica.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Según la ONU (Organización de las Naciones Unidas), la población humana alcanzará los 9.8 billones para el 2050 [1], lo que requerirá el 50% más de alimentos para el año 2025 [2]. Esta proyección plantea importantes desafíos en términos de sostenibilidad, especialmente en el uso eficiente de los recursos hídricos y energéticos [3]. Factores como la sobre extracción, el cambio climático [4], la industrialización, el crecimiento poblacional [5] y el agotamiento de recursos [6] ejercen presión sobre los sistemas productivos, demandando una gestión más inteligente del agua [5] para garantizar la seguridad alimentaria global [7]. Por lo tanto, es urgente la necesidad de desarrollar técnicas de optimización para el riego sostenible, precisas y adaptativas [7]. Por este motivo, el análisis de previsión estratégica [8], tecnologías avanzadas como el internet de las cosas (IoT) [9], nos ayudará a responder a los desafíos del futuro; como por ejemplo, el estrés abiótico [10]. Este estudio, se enfoca en el estrés térmico e hídrico controlado para la papa (*Solanum tuberosum*). Que consiste en evaluar los impactos climáticos e hídricos en las fases fenológicas (emergencia, brotes laterales, botón floral, floración, maduración) [11]; que representa un paso importante en la adaptación y respuesta con mayor eficacia a los cambios climáticos[12].

En la literatura han explorado los efectos de este enfoque sobre el crecimiento y la productividad, con resultados que varían según las condiciones y el manejo aplicado; entre ellos está Perez et al. [13] que evaluó cinco cultivares de papa en Perú bajo tres frecuencias de riego (cada 7, 14 y 21 días); variedades como ‘Canchán’ y ‘Wankita’ mostraron mayor tolerancia a la sequía, manteniendo buen rendimiento con menos agua, concluyendo que el estrés hídrico influyen de manera positiva en el crecimiento y producción de la papa; en otro estudio realizado por Jacques et al. [14], probó distintos niveles y duraciones de estrés aplicando potenciales métricos de -20, -40 y -60 kPa por 1, 3 y 7 días, y encontró que un estrés moderado y breve permitió recuperación completa y una reducción del uso de agua en un 10 %, mientras que el estrés

21 prolongado sí causó pérdidas productivas debido a la disminución de la actividad fotosintética, el cierre estomático, la reducción del área foliar y la anticipación de la senescencia, factores que limitan la acumulación de biomasa y afectan negativamente el desarrollo de los tubérculos, especialmente cuando el estrés ocurre durante fases críticas como la tuberización; sin embargo, en otro estudio realizado por Ekinzog et al. [15], en el norte de Alemania, al aplicar modelos del índice de estrés hídrico en cultivos, con sensores térmicos, meteorología y drones, se observó que la reducción del riego generó una caída del rendimiento del 10% al 15%. Lo que refleja que la respuesta al estrés hídrico y térmico no controlado pueden causar incluso la pérdida total del rendimiento del tubérculo [16]. No obstante, todos estos estudios se enfocan en variedades comerciales, dejando de lado las características fisiológicas y agronómicas particulares de la papa prebásica; esta limitación evidencia la necesidad de adaptar los modelos de estrés hídrico y térmico a materiales genéticos distintos, cuya respuesta aún no ha sido lo suficientemente documentada.

3 En este contexto, las soluciones tecnológicas desarrolladas para la gestión de variables de estrés hídrico y térmico en ambientes agrícolas controlados; entre ellas, el Internet de las Cosas (IoT) [9], se ha consolidado como una herramienta estratégica en la agricultura de precisión [17], al facilitar la automatización de procesos críticos como el riego, la ventilación y la regulación térmica, lo que se traduce en una significativa optimización del uso de recursos y en la reducción de costos operativos. Los siguientes estudios dan cuenta de su efectividad: Ordoñez y Cieza [18] integraron sensores de humedad y temperatura con plataformas IoT, alcanzando una disminución del 70–80 % en el consumo hídrico en invernaderos. Di Gennaro et al. [19] diseñaron un sistema de riego automatizado empleando sensores de humedad, microcontroladores Arduino y conectividad GPRS, lo que permitió mejorar la eficiencia hídrica en cultivos de olivo y durazno a bajo costo. Castillo Cabrera. [20] Diseñaron un sistema automatizado de invernadero basado en hardware y software de código abierto, utilizando Arduino y LabVIEW para monitoreo y control de temperatura. El sistema emplea control PID configurado por software para activar automáticamente el riego o ventilación solo cuando es necesario, buscando reducir costos frente a soluciones comerciales. López Ordoñez [21] implementó un sistema de supervisión ambiental basado en sensores de bajo costo y plataforma Arduino, dirigido a productores de pequeña escala, permitiendo el monitoreo continuo de variables ambientales que afectan el desarrollo fisiológico de los cultivos; asimismo. Carlozama Flores [22] propuso un sistema SCADA de

código abierto para la visualización y gestión en tiempo real de variables agronómicas, sustituyendo procesos manuales por una interfaz gráfica interactiva y de fácil acceso. No obstante, se observa una ausencia y falta de experimentación del estrés hídrico y térmico en entornos controlados, a pesar de su potencial para mejorar la eficiencia en el uso del agua y aumentar la productividad mediante su aplicación dirigida en fases fenológicas estratégicas.

En respuesta a esta brecha, este artículo trabajo propone el diseño e implementación de un sistema inteligente de riego y control térmico de bajo costo, como parte del proyecto DARY (Complejo Científico de la Papa, Dary Malinovki), basado en modelos de estrés hídrico y térmico aplicados específicamente al cultivo de papa prebásica en condiciones controladas, con el objetivo de validar su viabilidad tanto en entornos experimentales como en aplicaciones productivas a distintas escalas agrícolas.

2. Materials & methods

2.1 Study site and experimental design

La investigación se realizó bajo condiciones climáticas de Siberia Central, con inviernos largos y fríos, y veranos cortos pero relativamente cálidos. El estudio se realizó en un invernadero experimental tipo túnel, ubicado en la ciudad de Krasnoyarsk, (56°1'36.00"N, 92°44'27.02"E), dentro de las instalaciones de la empresa OOO SXP "Dary Malinovki". El invernadero presenta dimensiones de 30 m de largo, 9.6 m de ancho y 4.6 m de altura máxima, y está cubierto con polietileno agrícola calibre 720 con aditivos UV. El estudio se desarrolló durante dos temporadas vegetativas consecutivas en el año 2024, con una duración total de 180 días (dos periodos de 90 días cada uno). Se trabajó con tres variedades prebásicas: Krasa Meshchery (*Solanum tuberosum* L. cv. Krasa Meshchery) [23], Red Scarlett (*Solanum tuberosum* L. cv. Red Scarlett) [24] y Lilly (*Solanum tuberosum* L. cv. Lilly) [25], cultivadas a lo largo de todo su ciclo vegetativo; la primera temporada se extendió desde inicios de abril hasta fines de junio, y la segunda desde inicios de julio hasta fines de septiembre. Las variedades se distribuyeron en nueve mesas de cultivo, conforme se muestra en la Fig. 1: mesas 1 a 3 para Krasa Meshchery, mesas 4 a 6 para Red Scarlett, y mesas 7 a 9 para Lilly, numeradas desde la parte posterior hacia el frente del invernadero; cada mesa mide 8.0 x 1.8 m, en ellas se colocaron 900 macetas individuales de polietileno (90 × 90 × 140 mm), dispuestas en alineación lineal para optimizar la cobertura del

sistema de riego. Cada maceta fue rellena con turba comercial [26], cuyo análisis fisicoquímico mostró una humedad del 52 %, pH 6.0, contenido total de nitrógeno de 0.893 %, fósforo de 0.116 % y potasio de 2412 mg/kg [26]. Durante el experimento, no se aplicaron fertilizantes adicionales ni otras enmiendas, con el fin de aislar y evaluar de manera precisa el efecto del manejo del estrés hídrico y térmico sobre el rendimiento del cultivo; asimismo, se mantuvieron condiciones ambientales homogéneas (riego, temperatura y la humedad de la turba), garantizando así la uniformidad experimental y minimizando la variabilidad entre ellas.

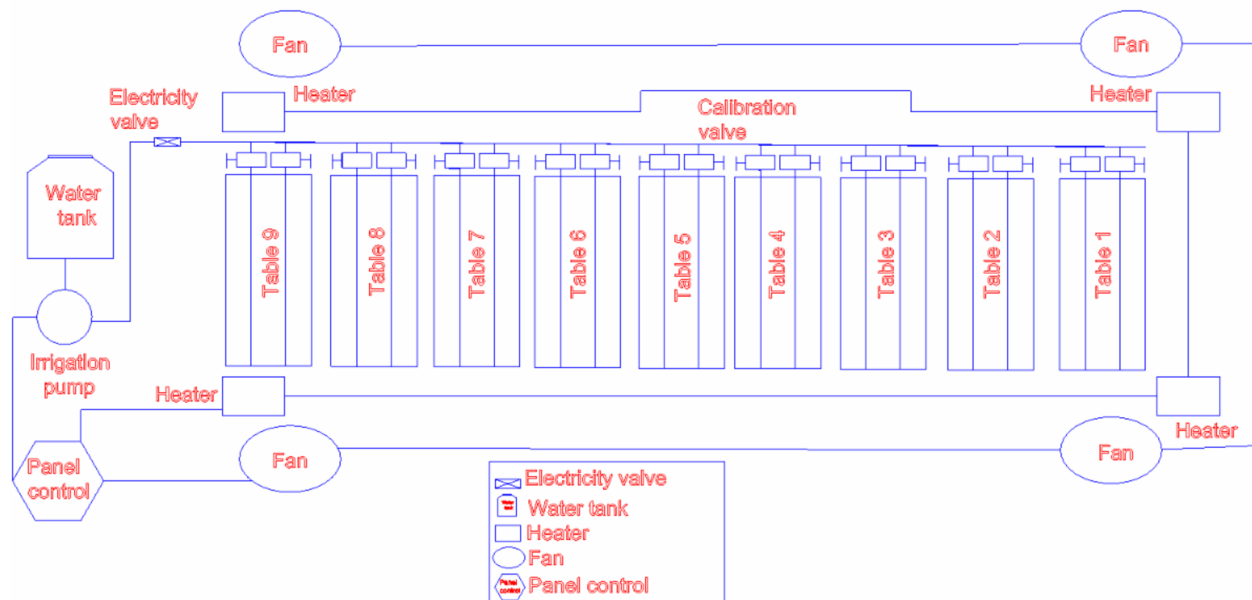


Fig. 1. Esquema de distribución de componentes del sistema de control de temperatura y riego inteligente: Ventilación(eclipse); Calefactor(cuadrado); bomba de agua(redondo); tanque de agua; válvula eléctrica solenoide(rectángulo);panel de control(hexágono).

2.2. Hardware and software Architecture

El sistema inteligente de riego y control climático, desarrollado en el marco del proyecto DARY, se estructura sobre una arquitectura modular, escalable y de bajo costo. Esta arquitectura integra sensores IoT, microcontroladores y una aplicación web. Con este diseño, es posible realizar el monitoreo remoto y en tiempo real, así como el control automatizado basado en modelos de estrés hídrico y térmico. Además, el sistema permite el almacenamiento histórico de datos, lo que facilita su análisis posterior.

2.2.1 Capa física (sistema hardware): El sistema físico del invernadero inteligente está compuesto por una red integrada de sensores y actuadores, diseñada para monitorear y controlar automáticamente las condiciones internas, principalmente la temperatura ambiental y la humedad del sustrato de turba.

La infraestructura hidráulica se presenta en la Fig. 1, donde se organiza a partir de una tubería principal de riego de 3", de la cual se derivan tuberías secundarias de 1" que distribuyen el agua hacia las mesas de cultivo. El flujo hídrico es impulsado por una bomba de trasvase modelo CG-150 (forma redonda), conectada a un tanque de almacenamiento de 2500 litros (forma cilíndrica), que actúa como fuente principal de abastecimiento. Para la gestión del riego, se incorpora una válvula solenoide eléctrica de 1/4", 220 V (forma rectangular), encargada de abrir o cerrar el paso de agua en función de las lecturas de humedad del sustrato. Esta válvula es controlada mediante contactores electromecánicos KMH 10910 de 9 A, integrados al sistema de control eléctrico junto con conectores industriales, lo que garantiza una operación precisa y segura. El monitoreo ambiental se lleva a cabo mediante un sensor de temperatura tipo PT100 con salida de 4–20 mA, y un sensor de humedad del suelo con salida estándar 4–20 mA, cuya función es detectar el nivel de humedad del sustrato y activar el riego automáticamente cuando se registran valores por debajo del umbral preestablecido. Para la regulación térmica, el sistema dispone de ventiladores de extracción DK-Air (forma de eclipse), que se activan automáticamente en condiciones de sobrecalentamiento, y calefactores eléctricos Volcano VR Mini (forma cuadrada), que se encienden durante periodos de baja temperatura. Ambos dispositivos operan de manera coordinada para mantener un microclima estable y adecuado para el desarrollo del cultivo; todos estos elementos están distribuidos a lo largo del invernadero como se muestra en la Fig. 1 y se encuentran interconectados a través de un panel de control centralizado (forma de hexágono), cuya unidad de procesamiento principal es un microcontrolador SIMATIC S7-1200, CPU 1214C. Este dispositivo regula en tiempo real tanto el flujo de agua como la activación del sistema de ventilación y calefacción, en función de los parámetros registrados por los sensores.

Adicionalmente, se implementó un sistema de monitoreo visual y control por voz como se muestra en la Fig. 2, basado en una unidad Raspberry Pi 4 Model B(1), que actúa como intermediario entre el sistema físico del invernadero y el entorno digital de supervisión; este

sistema incorpora una cámara Intel RealSense D415(2) conectada a un entorno Python v3.9, la cual permite la captura automática de imágenes con una frecuencia de cada día, mediante el uso de las bibliotecas *pyrealsense2* v2.54.1.5684 y *opencv-python* v4.8.0.76. Las imágenes generadas se transmiten de forma remota al usuario a través de la plataforma Telegram, utilizando las bibliotecas *schedule* v1.2.0 y *python-telegram-bot* v13.15, lo cual permite un monitoreo visual continuo del estado de las plantas en tiempo real, sin requerir intervención directa. Para el control por comandos de voz, se utilizó el parlante inteligente Yandex Max YNDX-00053(3) con la asistente virtual “Alice” de la empresa Yandex, que puede ser gestionada desde cualquier dispositivo inteligente del mismo fabricante; la integración con el sistema de control se realizó mediante el servicio gratuito “Alexstart”, el cual actúa como puente de comunicación entre los dispositivos Yandex y el panel de control del invernadero (4). Esta funcionalidad permite interactuar verbalmente con el sistema para gestionar funciones clave como el riego, la ventilación y la calefacción; los comandos de voz definidos incluyen: “Aliza, enciende modo automático”, “Aliza, apaga modo automático”, “Aliza, enciende modo manual”, “Aliza, apaga modo manual”, “Aliza, enciende riego”, “Aliza, apaga riego”, “Aliza, enciende ventilación”, “Aliza, apaga ventilación”, “Aliza, enciende calefacción” y “Aliza, apaga calefacción”; esta capacidad mejora significativamente la accesibilidad operativa del sistema y su usabilidad en condiciones de trabajo dinámicas, permitiendo al operario ejecutar acciones inmediatas sin necesidad de interacción física directa.



Fig. 2. Sistema de monitoreo visual automático y control por voz para gestión ambiental en invernadero.

Toda esta arquitectura física y funcional ha sido integrada con una plataforma digital de supervisión y control remoto, cuya interfaz principal es una aplicación web diseñada específicamente para el proyecto.

2.2.2 App web:

La aplicación web desarrollada como parte del sistema DARY se diseñó bajo un enfoque modular, escalable y orientado a servicios, con el objetivo de facilitar el monitoreo remoto, el control automatizado basado en modelos de estrés hídrico y térmico, y el almacenamiento estructurado de datos para análisis posteriores. En la Fig. 3 presentamos la arquitectura del sistema estructurada en cuatro capas bien diferenciadas: (1) capa física, que comprende los componentes hardware descritos en la sección 2.2.1, incluyendo sensores, actuadores y dispositivos de control; (2) capa de middleware de comunicación, responsable de la transmisión y sincronización de datos entre dispositivos IoT y la plataforma central; (3) capa de base de datos, encargada del almacenamiento estructurado y gestión de la información recolectada; y (4) la capa nube, que proporciona la interfaz de usuario para monitoreo y control remoto. Esta arquitectura modular y la funcionalidad de monitoreo, permite visualizar en tiempo real los datos capturados por sensores de humedad del suelo y temperatura ambiente. Esta visualización se actualiza automáticamente cada 5 minutos, facilitando una supervisión continua de las condiciones del invernadero facilita su adaptación a distintos entornos agrícolas y niveles de automatización, garantizando escalabilidad y mantenibilidad del sistema. [27],[28].

13

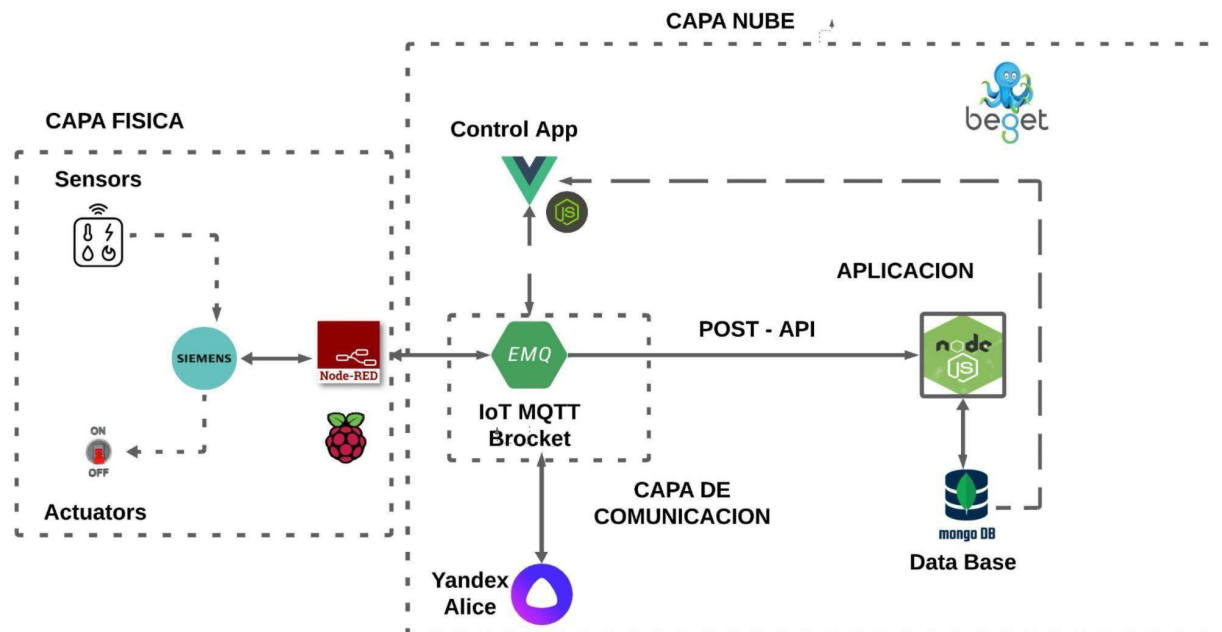


Fig. 3. Arquitectura de gestión del sistema de control de riego y temperatura.

En la capa física, el sistema utiliza sensores ambientales (humedad del suelo, temperatura ambiente) y actuadores (válvulas solenoides, ventiladores, calefactores) interconectados mediante un panel de control centralizado basado en el microcontrolador SIMATIC S7-1200. Este dispositivo gestiona en tiempo real el flujo de agua y el estado de los sistemas de ventilación y calefacción, en función de los parámetros registrados por los sensores. Adicionalmente, se emplea una Raspberry Pi 4 Model B como servidor local, responsable de recopilar datos analógicos/digitales, traducirlos a mensajes MQTT y transmitirlos al servidor perimetral vía Wi-Fi 2.4 GHz.

En la capa de comunicación se implementa el protocolo MQTT v3.1.1 sobre WebSocket, gestionado por un broker EMQX v5.0 que actúa como middleware IoT. Este servidor perimetral se encarga de suscribirse a temas específicos (topics): `/DarMar/Invernadero1/Auto` (modo automático), `/DarMar/Invernadero1/Manual` (modo manual), `/DarMar/Invernadero1/temperatura` (envío de datos del sensor de temperatura), `/DarMar/Invernadero1/humedad` (envío de datos del sensor de humedad), `/DarMar/Invernadero1/switches/ventilacion` (control de encendido y apagado de ventilación), `/DarMar/Invernadero1/switches/calefaccion` (control de encendido y apagado de calefacción), y `/DarMar/Invernadero1/switches/riego` (control de encendido y

apagado de riego). El broker se encarga de recibir datos desde los sensores, publicar estados hacia la aplicación web/móvil y retransmitir comandos del usuario hacia el microcontrolador principal. Esta estrategia asegura baja latencia, alta disponibilidad y transmisión en tiempo real entre todos los componentes del sistema, como se observa en los resultados.

En la capa de base de datos se almacenan en una base de datos NoSQL MongoDB v6.0, donde se registran variables clave como ubicación, módulo, periodo fenológico, estado de riego, ventilación, calefacción, humedad del suelo, temperatura ambiente, junto con marcas de tiempo UTC. Este formato JSON permite consultas históricas, generación de reportes y validación de decisiones tomadas por el sistema automático. Los registros son accesibles tanto desde la aplicación web como desde APIs RESTful implementadas en Express.js, que soportan métodos GET, POST, PUT y DELETE.

La capa de nube, interfaz de usuario, está desarrollada en React.js como frontend, ofreciendo una experiencia intuitiva y dinámica en dispositivos móviles y de escritorio. El backend, construido con Node.js y Express.js, procesa solicitudes RESTful y sincroniza datos con el servidor MQTT. La plataforma permite monitoreo en tiempo real de las variables críticas (temperatura, humedad de la turba), selección entre modo manual o automático, generación de reportes históricos en formato CSV, notificaciones visuales ante desviaciones de parámetros y acceso remoto seguro desde cualquier lugar con conexión a internet. Además, el sistema incluye funcionalidades avanzadas como envío automático de imágenes capturadas por una cámara Intel RealSense D415 vía Telegram, así como control por voz mediante la asistente virtual “Alice” de Yandex.

Esta arquitectura integral no solo mejora la eficiencia en el uso de recursos hídricos y energéticos, sino que también posibilita la escalabilidad y adaptabilidad del sistema a diferentes condiciones climáticas y cultivos, consolidando a DARY como una solución tecnológica sostenible y de bajo costo para la agricultura de precisión.

2.3. Algoritmo de control de estrés Hídrico y Térmico

Como parte del sistema de automatización inteligente desarrollado para el cultivo de papa prebásica, se diseñó un algoritmo que regula de manera simultánea la humedad del suelo (turba) y la temperatura ambiente, en función del estado fenológico de la planta. Este enfoque permite

adaptar dinámicamente las decisiones de riego y ventilación a las necesidades fisiológicas propias de cada etapa del cultivo [9],[10].

La segmentación fenológica del cultivo se estructuró en tres periodos diferenciados: (i) emergencia y establecimiento, (ii) desarrollo vegetativo y tuberización inicial, y (iii) desarrollo de tubérculos y maduración inicial. Para cada una de estas fases se definieron umbrales específicos de humedad en la turba, así como rangos óptimos de temperatura ambiente diferenciados por franja horaria: día (08:00–19:00) y noche (19:00–08:00), con el fin de garantizar un desarrollo fisiológico adecuado. La Tabla 1 resume estos parámetros, utilizando la abreviatura DDS para indicar los días después de la siembra. correspondientes a cada etapa fenológica, los porcentajes objetivo de humedad en la turba y las temperaturas óptimas requeridas por horario.

Tabla 1. Parámetros óptimos de humedad de la turba y temperatura ambiente por etapa fenológica del cultivo de papa prebásica.

Periodo fenológico	Días después de siembra (DDS)	% Humedad objetivo de la turba	Temperatur a nocturna (°C) 19:00 a 08:00	Temperatur a diurna (°C) 08:00 a 19:00
Periodo 1: Emergencia y establecimiento	0-30	65–75 %	15–17 °C	20–24 °C
Periodo 2: Desarrollo vegetativo y tuberización inicial	31-60	75–85 %	17–19 °C	21–25 °C
Periodo 3: Desarrollo de tubérculos y maduración inicial	61-90	60–70 %	14–16 °C	18-22 °C

El primer componente lógico del sistema automatizado corresponde al Algoritmo 1 gestiona automáticamente los subsistemas de temperatura y riego, utilizando como referencia los días transcurridos desde la siembra (DDS_COUNTER) para identificar la etapa fenológica actual del cultivo. Basado en dicha etapa y en el momento del día (día/noche, determinado por la hora actual), el sistema aplica los parámetros de humedad y temperatura definidos en la Tabla 1. La lógica de control es unidireccional: una vez que el cultivo progresa a una nueva etapa fenológica, no puede retroceder, incluso si se reinicia el sistema o se producen lecturas anómalas, lo que garantiza una operación estable y libre de fluctuaciones indeseadas. El sistema activa los ventiladores, calefactores y riego automático conforme a los valores objetivos correspondientes.

Algoritmo 1. Control por periodos fenológicos

```

1. // Determinar tipo de periodo (día/noche)
2. IF Hora_Actual  $\geq$  8 AND Hora_Actual < 19 THEN
3.   EsDia  $\leftarrow$  TRUE
4. ELSE
5.   EsDia  $\leftarrow$  FALSE
6. END IF
7. IF DDS_COUNTER  $\leq$  30 THEN
8.   Activar_Periodo_1
9.   IF EsDia THEN
10.    TEMP_OBJETIVO  $\leftarrow$  TEMP_OBJ_DIA[20–24]
11.    HUM_OBJETIVO  $\leftarrow$  HUM_OBJ_DIA[65–75]
12.   ELSE
13.    TEMP_OBJETIVO  $\leftarrow$  TEMP_OBJ_NOCHE[15–17]
14.    HUM_OBJETIVO  $\leftarrow$  HUM_OBJ_NOCHE[65–75]
15.   END IF
16. ELSIF DDS_COUNTER > 30 AND DDS_COUNTER  $\leq$  60 THEN
17.   Activar_Periodo_2
18.   IF EsDia THEN
19.    TEMP_OBJETIVO  $\leftarrow$  TEMP_OBJ_DIA[21–25]
20.    HUM_OBJETIVO  $\leftarrow$  HUM_OBJ_DIA[75–85]
21.   ELSE
22.    TEMP_OBJETIVO  $\leftarrow$  TEMP_OBJ_NOCHE[17–19]
23.    HUM_OBJETIVO  $\leftarrow$  HUM_OBJ_NOCHE[75–85]
24.   END IF
25. ELSIF DDS_COUNTER > 60 AND DDS_COUNTER  $\leq$  90 THEN
26.   Activar_Periodo_3

```

```

27. IF EsDia THEN
28.     TEMP_OBJETIVO ← TEMP_OBJ_DIA[18–22]
29.     HUM_OBJETIVO ← HUM_OBJ_DIA[60–70]
30. ELSE
31.     TEMP_OBJETIVO ← TEMP_OBJ_NOCHE[14–16]
32.     HUM_OBJETIVO ← HUM_OBJ_NOCHE[60–70]
33. END IF
34. ELSIF DDS_COUNTER > 90 THEN
35.     END
36. END IF

```

Sobre esta base, el Algoritmo 2 introduce un esquema de control térmico adaptativo, que regula la temperatura interna del invernadero en función de la etapa fenológica del cultivo y del momento del día; para ello, compara de forma continua la temperatura ambiente (TEMP_AMBIENTE) con un valor objetivo dinámico, determinado a partir de listas indexadas por etapa y franja horaria (TEMP_OBJ_DIA y TEMP_OBJ_NOCHE). Durante cada ciclo de ejecución, el sistema identifica si es día o noche mediante la variable lógica (EsDia) y, con base en esta condición, selecciona el umbral térmico correspondiente asociado a la etapa fenológica actual (Periodo_Actual). Una vez determinado el valor objetivo, se realiza una comparación directa: si la temperatura ambiente se encuentra por debajo del valor de consigna, se activa el sistema de calefacción (heater) y se desactivan los ventiladores (fans); si, por el contrario, la temperatura excede dicho umbral, se habilita la ventilación forzada y se apaga la calefacción; en caso de que la temperatura se mantenga dentro del rango deseado, ambos dispositivos permanecen inactivos, lo que permite minimizar el consumo energético sin comprometer las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo. Este enfoque supera el esquema tradicional de control binario con umbrales fijos, ya que ajusta dinámicamente la consigna térmica de acuerdo con los requerimientos fisiológicos específicos de cada etapa fenológica, promoviendo un microclima más estable y eficiente a lo largo del ciclo productivo.

Algoritmo 2 Control térmico.

```

1. IF EsDia THEN
2.     TEMP_OBJETIVO ← TEMP_OBJ_DIA[Periodo_Actual]
3.     IF TEMP_AMBIENTE < TEMP_OBJETIVO THEN
4.         Activar_Heater ← TRUE
5.         Activar_Fans ← FALSE

```

```

6.  ELSIF TEMP_AMBIENTE > TEMP_OBJETIVO THEN
7.    Activar_Heater ← FALSE
8.    Activar_Fans ← TRUE
9.  ELSE
10.   // TEMP_AMBIENTE == TEMP_OBJETIVO
11.   Activar_Heater ← FALSE
12.   Activar_Fans ← FALSE
13. END IF
14. ELSE
15.   TEMP_OBJETIVO ← TEMP_OBJ_NOCHE[Periodo_Actual]
16.   IF TEMP_AMBIENTE < TEMP_OBJETIVO THEN
17.     Activar_Heater ← TRUE
18.     Activar_Fans ← FALSE
19.     ELSIF TEMP_AMBIENTE > TEMP_OBJETIVO THEN
20.       Activar_Heater ← FALSE
21.       Activar_Fans ← TRUE
22.     ELSE
23.       // TEMP_AMBIENTE == TEMP_OBJETIVO
24.       Activar_Heater ← FALSE
25.       Activar_Fans ← FALSE
26.     END IF
27. END IF

```

De forma complementaria, el Algoritmo 3, es encargada de implementar la lógica hídrica inteligente, que regula la activación del sistema de riego en función de la humedad del sustrato (turba), adaptando dinámicamente los umbrales de actuación a la etapa fenológica actual del cultivo; para ello, utiliza mediciones obtenidas en tiempo real a partir de sensores de humedad, las cuales son comparadas con valores objetivo almacenados en una lista indexada (HUM_OBJ_DIA[]) según la variable (Periodo_Actual). El sistema opera únicamente durante el periodo diurno, determinado por la variable lógica (EsDia), bloqueando de forma deliberada el riego nocturno como medida de prevención frente al riesgo de encharcamiento y con el propósito de favorecer una mayor oxigenación radicular del sustrato. En cada ciclo de control, si el valor de humedad medido (HUMEDAD_TURBA) es inferior al valor objetivo, se activa la bomba de riego; en caso contrario, ya sea que la humedad coincida o supere el umbral definido, el sistema mantiene la bomba desactivada, evitando así riesgos innecesarios. Esta estrategia mejora las soluciones de control rígido tradicionales al incorporar una lógica sensible al estado fenológico

del cultivo, lo que permite un uso más eficiente del agua y una gestión hídrica coherente con los principios de la agricultura de precisión y la sostenibilidad productiva.

Algoritmo 3 Control hídrico.

```

1. IF EsDia THEN
2.   HUM_OBJETIVO ← HUM_OBJ_DIA[Periodo_Actual]
3.   IF HUMEDAD_TURBA < HUM_OBJETIVO THEN
4.     Activar_BOMBA ← TRUE
5.   ELSIF HUMEDAD_TURBA > HUM_OBJETIVO THEN
6.     Activar_BOMBA ← FALSE
7.   ELSIF HUMEDAD_TURBA = HUM_OBJETIVO THEN
8.     Activar_BOMBA ← FALSE
9.   END IF
10. ELSE
11.   // Noche: riego desactivado
12.   Activar_BOMBA ← FALSE
13. END IF

```

Para gestionar la interacción entre los modos de operación del sistema, el Algoritmo 4 articula la conmutación entre los entornos automático y manual, integrando tanto el funcionamiento en línea (con conectividad activa a internet) como en modo fuera de línea (ante pérdidas temporales de conectividad). Esta arquitectura garantiza la continuidad funcional del sistema frente a fallos de red o intervenciones del operador. Por defecto, el sistema inicia en modo automático, activando los algoritmos de control térmico e hídrico en función de los parámetros definidos para cada etapa fenológica del cultivo. Esta condición se mantiene mientras no se seleccione manualmente el modo manual. En dicho modo, el operador puede intervenir directamente a través de la interfaz local o mediante comandos de voz. El sistema establece automáticamente la conexión a internet cuando la red está disponible. Al estar en línea, se habilitan funciones extendidas como el envío de imágenes diarias y la recepción de comandos remotos (ver Fig. 2). En caso de interrupción de la conexión Wi-Fi, el sistema continúa operando de forma local bajo el último modo activo (automático o manual), utilizando los datos almacenados en el microcontrolador para mantener el control climático e hídrico del invernadero. Una vez restablecida la conectividad, la Raspberry Pi se reconecta de manera autónoma, reanudando la

comunicación con el microcontrolador, sin requerir intervención manual, y restaurando así las funcionalidades remotas.

Esta lógica de operación dual, con capacidad de adaptación en tiempo real, fortalece la resiliencia del sistema frente a condiciones cambiantes y asegura un control ambiental continuo, eficiente y seguro.

Algoritmo 4 Control Automático y manual con conectividad opcional.

```
// ----- Evaluar el modo actual de operación -----
1. IF Modo_Manual = TRUE THEN
2.   // ----- Modo Manual -----
3.   Activar_Control_Automatico ← FALSE
4.   IF Modo_Online = TRUE THEN
5.     Ejecutar_Comandos_Voz_Alice()    // Control remoto por voz
6.     Enviar_Imagenes_Telegram()      // Envío diario de imágenes
7.   END IF
8.   Ejecutar_Comandos_Locales()        // Control manual desde panel físico
9.   Conservar_Estado_Manual()          // Mantener estado incluso sin red
10. ELSE
11.   // ----- Modo Automático -----
12.   Activar_Control_Automatico ← TRUE
13.   IF Modo_Online = TRUE THEN
14.     Ejecutar_Comandos_Voz_Alice()    // Control remoto por voz
15.     Enviar_Imagenes_Telegram()      // Envío diario de imágenes
16.   END IF
17.   Ejecutar_Algoritmo_Control_Termico() // Control ambiental
18.   Ejecutar_Algoritmo_Control_Riego()  // Control hídrico
19. END IF
```

En la Fig 4. Se resume la integración funcional de estos algoritmos dentro de una arquitectura de control maestro, donde cada componente (Algoritmos 1 al 4) actúa de manera sincronizada a partir de reglas definidas por etapa fenológica y condiciones ambientales. Este núcleo central coordina la lectura continua de variables ambientales y fenológicas clave, como la temperatura interna, la humedad de la turba y los días después de la siembra; que ejecuta decisiones en función de reglas condicionales predefinidas para cada etapa del cultivo. La activación de los actuadores (ventiladores, calefactores y bomba de riego) se lleva a cabo bajo lógica determinista, ya sea en modo automático o manual, y con capacidad de funcionamiento tanto en línea (con conectividad activa) como fuera de línea (ante pérdida temporal de red), lo que garantiza robustez, autonomía y continuidad operativa; el Algoritmo 1 identifica dinámicamente la etapa

fenológica actual del cultivo y asigna los valores de consigna térmica e hídrica que alimentan los módulos de control de temperatura (Algoritmo 2) y riego (Algoritmo 3). Por su parte, el Algoritmo 4 regula el modo operativo general, permitiendo conmutar entre control automático, basado en sensores y reglas internas (Tabla 1) y control manual, donde el operador puede intervenir directamente desde la interfaz física o mediante comandos de voz (ver Fig 2), asegurando que el sistema continúe funcionando independientemente ante pérdidas de conectividad. En conjunto, esta arquitectura de control distribuido y adaptativo permite una gestión inteligente, resiliente y flexible del ambiente agrícola, optimizando las condiciones para el desarrollo fisiológico del cultivo y favoreciendo la interacción eficiente entre el sistema y el usuario.

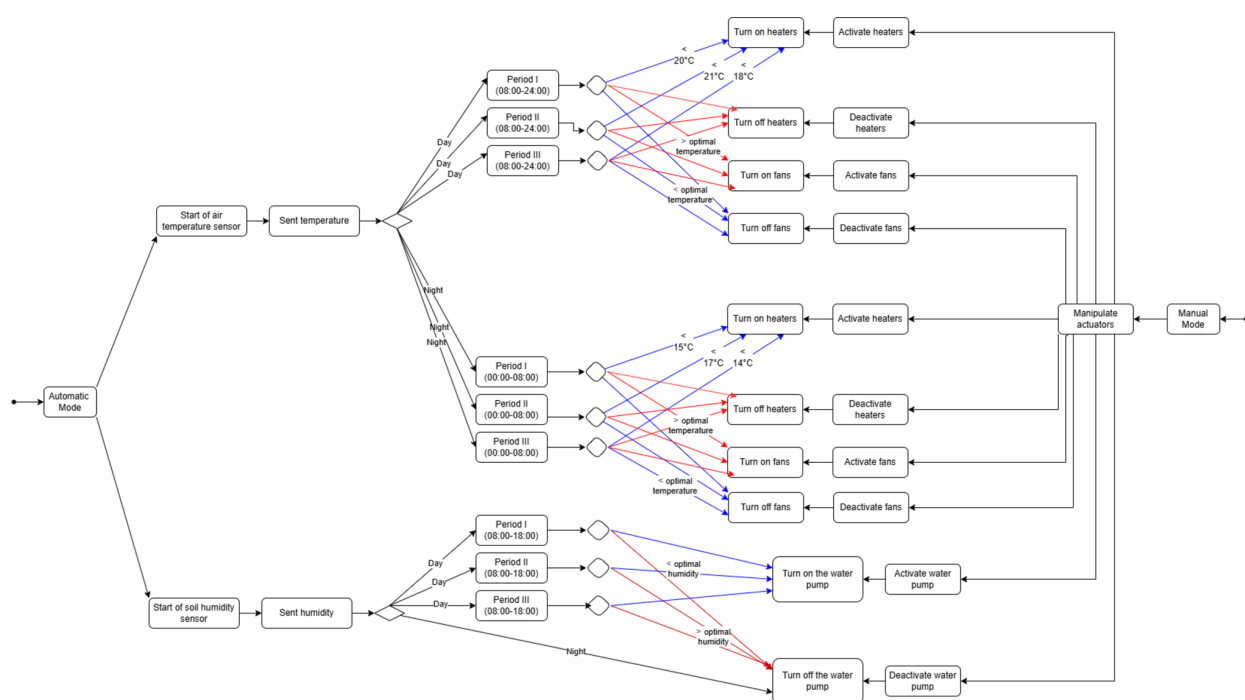


Fig. 4. Diagrama de operación del sistema: modos automático y manual con coordinación de algoritmos térmico e hídrico.

Luego de haber descrito en la metodología la estructura lógica y funcional del sistema de automatización propuesto, en la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos en campo, donde se analiza el desempeño real del sistema y los algoritmos.

3. Results & discussion

3.1 Control inteligente del estrés hídrico y térmico en el cultivo de papa prebásica

La Fig. 5, muestra el monitoreo de las condiciones internas del invernadero durante dos temporadas vegetativas: abril a junio (Vegetación 1) y julio a septiembre (Vegetación 2). Se representan el consumo de agua (barras verdes), la temperatura diurna y nocturna (líneas roja y morada, respectivamente), y la humedad del sustrato (línea azul), todos expresados en intervalos decenales. Se observa una estabilidad térmica notable, en ambos periodos, con temperaturas diurnas medias que oscilaron entre 20 °C y 24 °C, y nocturnas entre 14 °C y 17 °C. La humedad media del sustrato se mantuvo dentro de un rango óptimo del 60 % al 82 %, lo cual evidencia el buen funcionamiento del sistema de control automatizado. Asimismo, el consumo de agua presentó una evolución progresiva en ambos ciclos, aumentando gradualmente durante las fases críticas del cultivo y disminuyendo hacia el cierre del ciclo, lo que demuestra una regulación eficiente mediante riego inteligente.

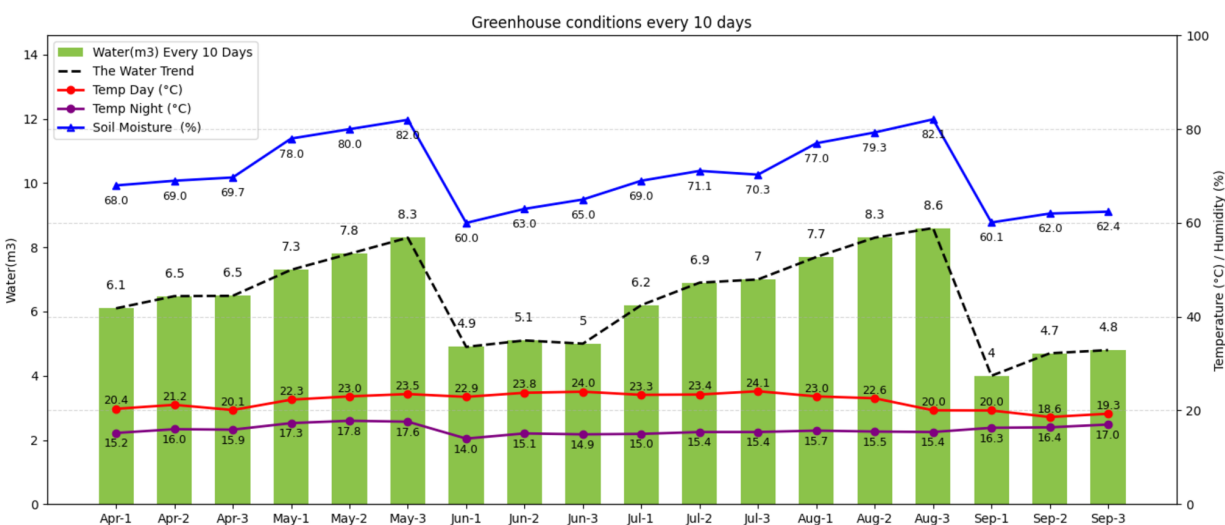


Fig. 5. Resultados del sistema de control automatizado del estrés hídrico y térmico: evolución cada 10 días del consumo de agua, temperatura día/noche y humedad de la turba.

La Tabla 2 complementa y resume estos resultados, mostrando una comparación entre el sistema DARY y el sistema convencional en términos de producción total, consumo de agua y uso de electricidad, a lo largo de los dos ciclos evaluados. Aunque se incluyen los valores parciales por ciclo como referencia, los porcentajes presentados reflejan la diferencia acumulada total, que constituye el dato central del análisis.

El sistema DARY logró aumentar la producción de papa en un 22 % con respecto al método convencional, redujo el consumo de agua en un 27 % y el consumo eléctrico en un 12% con la

regulación eficiente mediante riego inteligente. Estos resultados reflejan una mejora simultánea en productividad y eficiencia de recursos, lo que refuerza la viabilidad del enfoque automatizado como alternativa tecnológica para cultivos intensivos en condiciones controladas.

Tabla 2: Comparación general entre el sistema DARY y el sistema convencional por dos ciclos de cultivo.

Indicador	Vegetación 1 (DARY / Conv.)	Vegetación 2 (DARY / Conv.)	Total (DARY / Conv.)	% Diferencia (Total)
Producción total (unidades)	61,404 / 50,500	59,324 / 48,274	120,728 / 98,774	+22%
Consumo de agua (m3)	57.5 / 90	58.8 / 71	116,3 / 161	−27 %
Consumo eléctrico (kWh)	41,021.5 / 47,440	34,887.6 / 39,420	75,909.1 / 86,860	−12 %

3.2. Aplicación web de gestión remota para el monitoreo, control y análisis de datos del invernadero

La arquitectura desarrollada del sistema se distingue por su diseño modular, escalable y ligero, lo que facilitó la integración de nuevos sensores y actuadores sin comprometer el rendimiento general. Con la comunicación basada en el protocolo MQTT, el sistema permite la interoperabilidad con plataformas externas y servicios en la nube, posibilitando el envío de datos de sensores a cualquier API mediante un broker MQTT, ampliando así su potencial de integración con soluciones de agricultura de precisión. La aplicación web, implementada con enfoque responsivo, ofrece una interfaz gráfica intuitiva accesible desde cualquier dispositivo conectado a la red, con capacidades tanto de operación automática, donde el sistema gestiona el riego y la temperatura con base en parámetros fisiológicos del cultivo como manual, útil para validaciones o contingencias operativas. Las pruebas de carga, realizadas en un entorno cloud Linux (CPU 4 núcleos, 6 GB RAM, almacenamiento NVMe 80 GB), demostraron alta eficiencia

en el uso de recursos: consumo máximo del 10 % de CPU y 0.5 GB de memoria RAM, incluso bajo múltiples solicitudes concurrentes, lo que respalda su estabilidad operativa, eficiencia en la gestión de recursos y capacidad de escalamiento horizontal (ver Fig. 6).

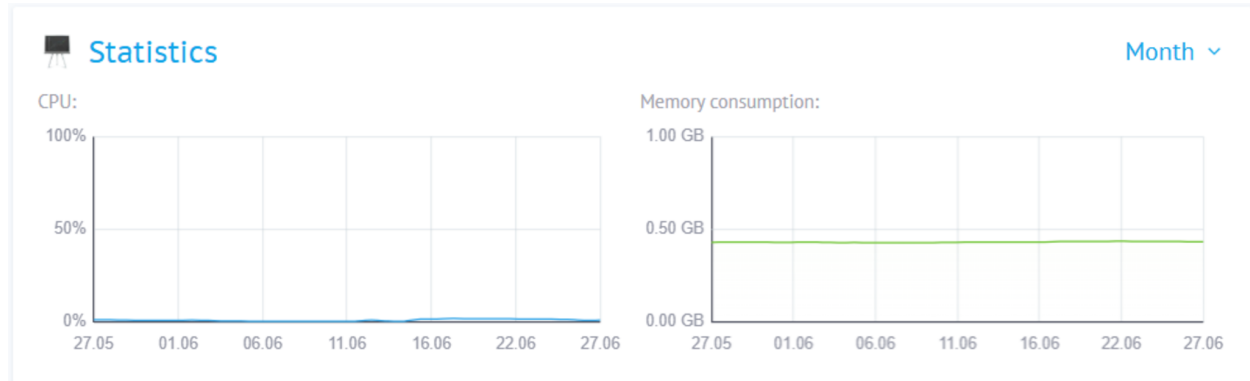


Fig. 6. Uso de CPU y memoria del servidor durante la operación completa del sistema

3.3 Análisis económico y evaluación de desempeño del sistema automatizado DARY.

La configuración experimental incluye un sistema de control de temperatura y riego inteligente en un invernadero para cultivos de papa prebasica. La viabilidad económica para los pequeños, medianos y grandes productores dependerá del tamaño y cantidad de invernaderos; los resultados obtenidos con una inversión total estimada de ₡200 000 como muestra la Tabla 3, DARY logra reducir en un 35% los costos frente a una solución comercial de referencia, cuyo costo asciende a ₡270 000, sin comprometer las funcionalidades ofrecidas; la distribución del presupuesto en DARY muestra una asignación racional de recursos: Un 37.5% del total se destinó a componentes de gestión y sensorización (₡75 000), un 2.5% a la infraestructura de red local (₡5 000) y un 60% al hardware de control y procesamiento central (₡120 000), incluyendo un Raspberry Pi 4, un PLC SIMATIC S7-1200, módulos de entradas/salidas y alimentación.

Tabla 3. Costos estimados de implementación del sistema automatizado DARY.

Componentes		Cost (₡)
Electrical hardware	Componentes de gestión (sensor de temperatura de aire, humedad del suelo, cables, relés,contactores...)	75 000

Wi-Fi router	5 000
--------------	-------

Raspberry Pi 4 Model B, PLC SIMATIC S7-1200, CPU 1214C - 6ES7214-1BG40-0XB0, SIMATIC S7-1200 Power Module -6EP1332-1SH71,SIMATIC S7-1200, analog I/O SM 1234 - 6ES7234-4HE32-0XB0,	120 000
--	---------

Inversion Total	200 000
------------------------	----------------

Desde el punto de vista técnico, el sistema DARY superó al sistema comercial en diversos indicadores clave; en términos de precisión, los sensores integrados presentaron un margen de error de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ para temperatura y $\pm 3\%$ para humedad relativa, mejorando notablemente la precisión del sistema convencional, cuya desviación en humedad alcanzó $\pm 5\%$. Ambos sistemas comparten características estructurales como el doble modo de operación (manual y automático), protección IP65, control de ventilación y calefacción, así como un rango operativo de temperatura de -40 a $+50^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa de hasta el 99% . No obstante, el sistema inteligente, incorpora funcionalidades avanzadas no disponibles en la alternativa evaluada, tales como respaldo periódico de datos, monitoreo por cámara integrado en Telegram, control por voz mediante asistente virtual, e interoperabilidad multiusuario con soporte de hasta 40 conexiones simultáneas. En este contexto, el sistema inteligente, propuesto se perfila como una arquitectura replicable y escalable para entornos agrícolas o industriales con requerimientos exigentes de automatización ambiental, particularmente en escenarios donde la relación costo-beneficio, la capacidad de adaptación digital y la accesibilidad tecnológica son determinantes. Sin embargo, se identifican limitaciones asociadas a la validación del sistema en condiciones de operación prolongada y a la necesidad de integración con protocolos robustos de ciberseguridad; futuras investigaciones deberán abordar estas dimensiones para consolidar su aplicabilidad en ambientes de producción reales.

4. Conclusion

Este estudio demostró que el control automatizado de estrés abiótico, particularmente el estrés hídrico y térmico, puede tener un impacto directo y significativo en la producción de papa prebásica (*Solanum tuberosum* L.) bajo condiciones controladas en un invernadero. A través del

sistema DARY, se logró una optimización fisiológica del cultivo, reflejada en un incremento del 22 % (de 98,774 a 120,728 unidades) en la producción de papa prebásica respecto al manejo convencional, lo que equivale a más de 21,954 unidades adicionales obtenidas en solo dos ciclos productivos.

Además del aumento en el rendimiento, se alcanzó una reducción del 27% (de 161 m³ a 116,3 m³) en el uso de agua y un ahorro energético del 12 % (de 86,860 kWh a 75,909,1 kWh), validando el enfoque de regulación ambiental precisa y adaptativa mediante sensores y algoritmos que responden en tiempo real a las condiciones de estrés impuestas. Estos resultados no solo mejoran la eficiencia de producción, sino que confirman que el manejo activo del estrés abiótico, puede ser una estrategia tecnológica eficaz para mejorar la calidad y cantidad de semilla prebásica.

A diferencia de los trabajos existentes, que se centran principalmente en cultivos comerciales o en condiciones óptimas, este estudio se enfoca en una etapa clave del sistema semillero, la papa prebásica, donde existe escasa o nula documentación científica sobre el uso de control ambiental automatizado frente a estrés abiótico. Esto representa un aporte relevante y necesario al campo de la agricultura inteligente, especialmente para regiones con limitaciones hídricas, térmicas o tecnológicas.

El sistema desarrollado, de arquitectura modular, bajo costo y alta eficiencia computacional (uso máximo de CPU: 10 %; RAM: 0,5 GB), demostró ser robusto y adaptable, y su diseño permite una fácil escalabilidad horizontal. Esto lo convierte en una alternativa realista para su implementación en otras zonas productoras, incluyendo áreas rurales con acceso limitado a infraestructura avanzada.

Como líneas futuras, se recomienda validar el sistema en diversas zonas agroecológicas, incorporar modelos predictivos basados en inteligencia artificial para anticipar la respuesta fisiológica de las plantas frente al estrés abiótico, y ampliar el monitoreo mediante sensores multiespectrales y nuevas variables agronómicas. Estas mejoras podrían consolidar aún más el papel del manejo inteligente del estrés abiótico como eje estratégico en la producción de semilla prebásica, sentando bases técnicas para el escalamiento nacional o regional de soluciones similares.

Ethics statement

Not applicable: This manuscript does not include human or animal research.

Credit authorship contribution statement

Rudy Soler Medina Pacompia: Validación, metodología, curación de datos. **Bill Canaza Chani:** Desarrollo y validación de arquitectura de hardware y software. **Nelida Gladys Maquera Sosa:** Redacción-revisión y supervisión, Conceptualización. **Angel Sullon:** Redacción-borrador original, Validación, Supervisión. **Muss Evgeny Ivanovich:** Visualización, Validación, Análisis formal, Conceptualización.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a la empresa OOO SXP “Dary Malinovki” por haber acogido y facilitado la realización de esta investigación en el marco del proyecto científico y tecnológico integrado. Asimismo, agradecemos de manera especial a la Dra. Nélica Gladys Maquera Sosa, cuya guía, liderazgo y constante orientación fueron fundamentales en cada etapa del proceso. Sin su dirección y compromiso, este trabajo no habría sido posible.

Data availability

References

- [1] S. Gautam, D.C. Scheuring, J.W. Koym, M.I. Vales, Assessing heat tolerance in potatoes: Responses to stressful Texas field locations and controlled contrasting greenhouse conditions, *Front Plant Sci* 15 (2024) 2. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1364244>.
- [2] A.T. Drobot, C. Jackson, Eighth IEEE IoT Vertical and Topical Summit at RWW 2025 - “Impact of Artificial Intelligence on Wireless IoT Systems: From Design to Application” [IEEE Radio & Wireless Week 2025], *IEEE Microw Mag* 25 (2024) 38–43. <https://doi.org/10.1109/MMM.2024.3459587>.
- [3] OECD-FAO Agricultural Outlook 2023–2032, OECD Publishing, Paris, 2023. <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>.

- [4] X. Liu, Z. Zhao, A. Rezaeipanh, Intelligent and automatic irrigation system based on internet of things using fuzzy control technology, *Sci Rep* 15 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98137-2>.
- [5] A. Sidhu, D. Bahri, S. Poornapushpakala, T. Agarwal, G. Ahluwalia, P. Chatterjee, IoT and Sensor-based Water Quality Monitoring for Sustainable Management of Water Resources, 2025 International Conference on Automation and Computation, AUTOCOM 2025 (2025) 398–403. <https://doi.org/10.1109/AUTOCOM64127.2025.10957332>.
- [6] N.K. Narang, Mentor’s Musings on Green Challenges for IOT, Edge Computing & All Other Disruptive Digital Technologies, *IEEE Internet of Things Magazine* 8 (2025) 4–10. <https://doi.org/10.1109/MIOT.2025.10980615>.
- [7] M.K. Meriç, Implementation of a wireless sensor network for irrigation management in drip irrigation systems, *Sci Rep* 15 (2025). <https://doi.org/10.1038/S41598-025-97303-W>.
- [8] S.D. Prager, K. Wiebe, Strategic foresight for agriculture: Past ghosts, present challenges, and future opportunities, *Glob Food Sec* 28 (2021) 100489. <https://doi.org/10.1016/J.GFS.2020.100489>.
- [9] S. Gupta, S. Chowdhury, R. Govindaraj, K.T.T. Amesho, S. Shangdiar, T. Kadhila, S. Iikela, Smart Agriculture Using IoT for Automated Irrigation, Water and Energy Efficiency, *Smart Agricultural Technology* (2025) 101081. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2025.101081>.
- [10] N.A. Khan, L. Owens, M. Nunez, A.L. Khan, Complexity of combined abiotic stresses to crop plants, *Plant Stress* (2025) 100926. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2025.100926>.
- [11] D.-3, S. Deniss Malpica, Análisis del Balance Hídrico y Rendimiento del Cultivo de Papa (Variedad Amarilis) durante la campaña agrícola 2024-2025 en La Encañada, Cajamarca, Perú, Peru, 2025. <https://www.gob.pe/es/i/6814449> (accessed June 25, 2025).
- [12] P.C. Mba, J.N. Njoku, D.D. Uyeh, Enhancing resilience in specialty crop production in a changing climate through smart systems adoption, *Smart Agricultural Technology*. 11 (2025) 100897. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100897>.
- [13] E. Perez, R.R.R. Rutte, G. Osorio, Estrés hídrico en el crecimiento y rendimiento de cultivares comerciales de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la región centro del Perú, *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research* 26 (2024) 46–55. <https://doi.org/10.18271/RIA.2024.587>.

- [14] M.M. Jacques, S.J. Gumiere, J. Gallichand, P. Celicourt, T. Gumiere, Impacts of Water Stress Severity and Duration on Potato Photosynthetic Activity and Yields, *Frontiers in Agronomy* 2 (2020) 590312. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.590312>
- [15] E.K. Ekinzog, M. Schlerf, M. Kraft, F. Werner, A. Riedel, G. Rock, K. Mallick, Revisiting crop water stress index based on potato field experiments in Northern Germany, *Agric Water Manag* 269 (2022) 107664. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107664>.
- [16] H. Cabrera, R. Otiniano, R. Pando, H.S. Garcia, W.H. Rodriguez, J.M. Pérez, S. de Haan, M. Gastelo, INIA 333 – CHUGAYNA new Potato Variety Resilient to Climate Change for the Family Farming System with Tolerance to Frost, Resistant to Late Blight and high Quality for Fresh Consumption, *American Journal of Potato Research* 102 (2025) 119–128. <https://doi.org/10.1007/s12230-024-09975-1>.
- [17] D. Thanh Tran, H. Su Le, J.H. Huh, Building an Automatic Irrigation Fertilization System for Smart Farm in Greenhouse, *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 70 (2024) 4685–4698. <https://doi.org/10.1109/TCE.2023.3304554>.
- [18] Ordoñez Huaman, Y.J., Cieza Quispe, Y.D., 2024. Diseño de un sistema de control automatizado mediante tecnología Arduino para el riego del vivero de la Municipalidad Provincial de Jaén – Perú (Tesis de Grado). Universidad Nacional de Jaén, Jaén, Perú. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/662>
- [19] S.F. Di Gennaro, D. Cini, A. Berton, A. Matese, Development of a low-cost smart irrigation system for sustainable water management in the Mediterranean region, *Smart Agricultural Technology* 9 (2024) 100629. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2024.100629>.
- [20] R.L.A. Castillo Cabrera, R.A. Leon León, J. Rodríguez Vílchez, E. Gamarra Floreano, Diseño de invernadero con sistema de control de temperatura y humedad automatizado mediante PID en Trujillo - Perú, *INGnosis* 7 (2021) 01–14. <https://doi.org/10.18050/INGNOSIS.V7I1.2099>.
- [21] López Ordoñez, E.R., 2020. Diseño de un sistema de supervisión y control de parámetros de un invernadero automatizado (Tesis de Grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala City, Guatemala. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/13533>
- [22] Carlozama Flores, G.B., 2018. SCADA para invernadero sobre software libre (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8260>

- [23] Federal Research Center for Potato named after A.G. Lorkh, n.d. Potato varieties [Online]. Available at: <https://potato.professorhome.ru/originator/fgbnu-vnii-kartofelnogo-khozyaystva-im-ag-lorkha> (Accessed: 25 June 2025).
- [24] PotatoPro, n.d. Red Scarlett potato variety [Online]. Available at: <https://www.potatopro.com/potato-varieties/red-scarlett> (Accessed: 25 June 2025).
- [25] SOLANA GmbH, n.d. Lilly potato variety [Online]. Available at: https://www.solana.de/kartoffelsorten-detail_en/items/lilly.html (Accessed: 25 June 2025).
- [26] Pelgorskoe-M Peat Enterprise, n.d. Company website [Online]. Available at: <https://pelgorskoe.ru/> (Accessed: 25 June 2025).
- [27] A. Abdulhamid, S. Kabir, I. Ghafir, C. Lei, Quantitative failure analysis for IoT systems: an integrated model-based framework, International Journal of System Assurance Engineering and Management (2025). <https://doi.org/10.1007/S13198-024-02700-5>.
- [28] A. Morchid, B. Et-taibi, Z. Oughannou, R. El Alami, H. Qjidaa, M.O. Jamil, E.M. Boufounas, M.R. Abid, IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events, Sci Afr 27 (2025) e02527. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2024.E02527>.