



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Diseño e implementación de un invernadero inteligente
usando IOT para la producción continua y sostenible
de cebolla china en la localidad de Taquia en el
departamento de Amazonas**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Ruben Sandro SANTILLÁN SALAZAR

ASESOR

Dr. Carlos Alberto MORENO PAREDES

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Santillán, R. (2026). *Diseño e implementación de un invernadero inteligente usando IOT para la producción continua y sostenible de cebolla china en la localidad de Taquia en el departamento de Amazonas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Ruben Sandro Santillán Salazar
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	48196436
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Moreno Paredes
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	01292577
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9083-5316
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Celso Ysidro Gerónimo Huamán
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09191500
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Wilbert Chavez Irazabal
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08121733
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jean Carlos Malca Fernández
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	45535181
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.19.0.63 Sistemas de monitoreo y gestión ambiental, Internet de las cosas IOT, Sistemas de alerta temprana y prevención de desastre
Grupo de investigación	No Aplica

Agencia de financiamiento	No Aplica
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Amazonas Provincia: Chachapoyas Distrito: Chachapoyas Centro poblado: Taquia Latitud: -6.2542 Longitud: -77.8336
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Setiembre 2024 – Diciembre 2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Sistemas de automatización, Sistemas de control https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03 Horticultura, Viticultura https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#4.01.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN
TESIS
ACTA N°01/FIEE-PPP/2026

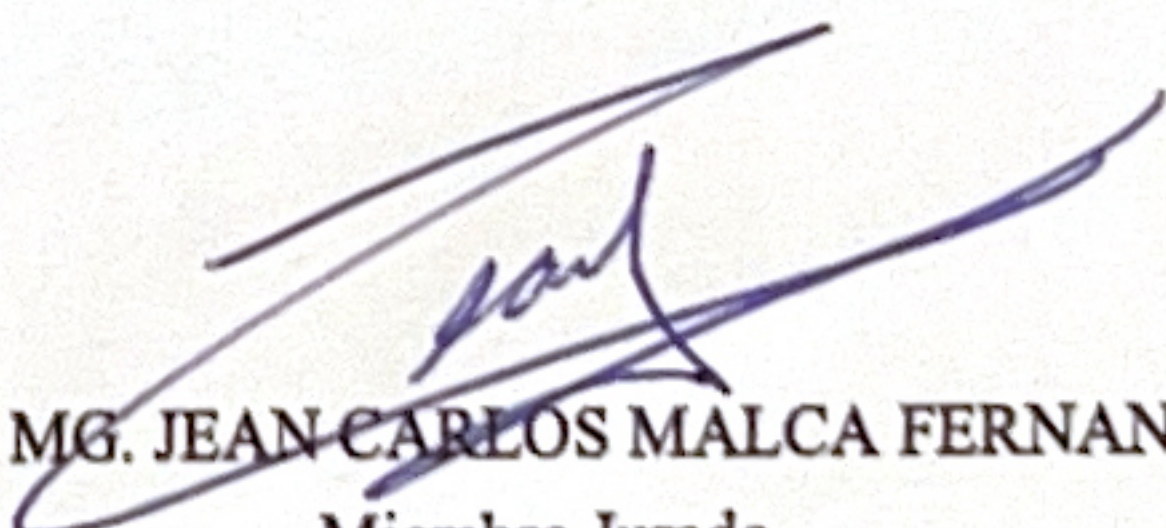
Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 06 de enero del 2026, como presidente de Jurado el **DR. CELSO YSIDRO GERÓNIMO HUAMÁN**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ**, el Miembro de Jurado el **MG. WILBERT CHAVEZ IRAZABAL** y Miembro Asesor el **DR. CARLOS ALBERTO MORENO PAREDES**.

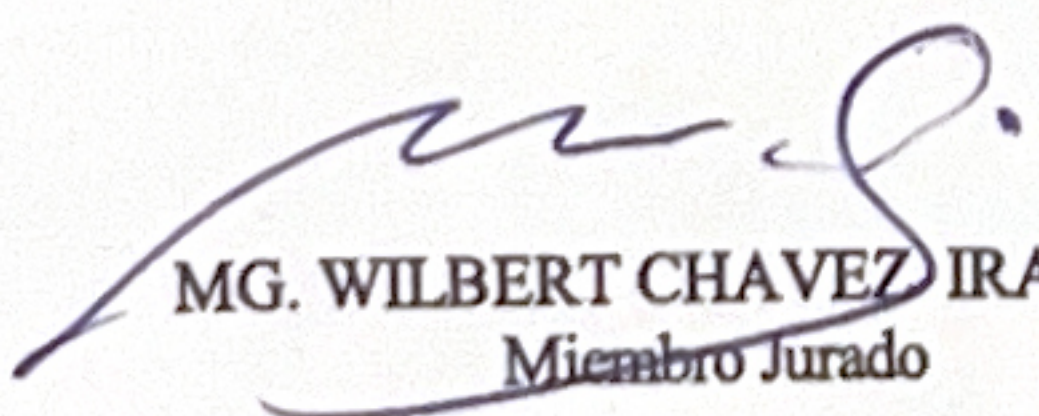
Después de escuchar la Sustentación Presencial de la Tesis del Bachiller **RUBEN SANDRO SANTILLÁN SALAZAR** con código 13190083 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico sustentó la Tesis titulada **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERNADERO INTELIGENTE USANDO IOT PARA LA PRODUCCIÓN CONTINUA Y SOSTENIBLE DE CEBOLLA CHINA EN LA LOCALIDAD DE TAQUIA EN EL DEPARTAMENTO DE AMAZONAS**.

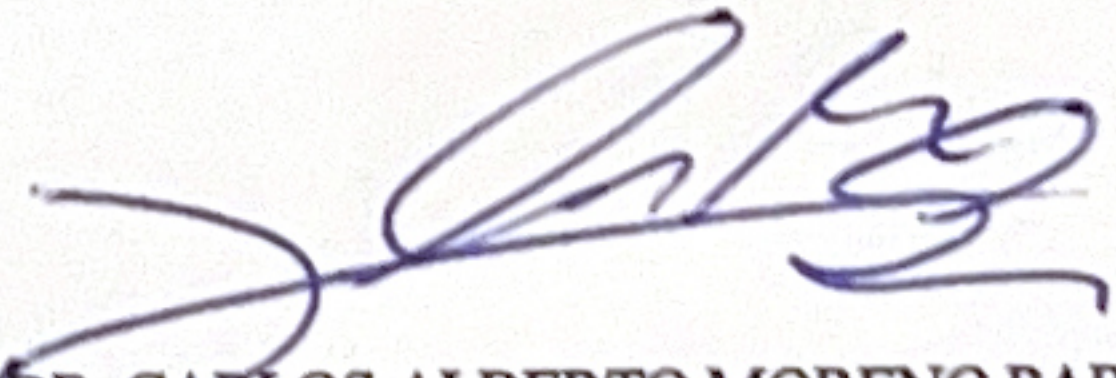
El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 17 (diecisiete).

Ciudad Universitaria, 06 de enero del 2026


DR. CELSO YSIDRO GERÓNIMO HUAMÁN
Presidente Jurado


MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ
Miembro Jurado


MG. WILBERT CHAVEZ IRAZABAL
Miembro Jurado


DR. CARLOS ALBERTO MORENO PAREDES
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo , **CARLOS ALBERTO MORENO PAREDES** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°32/FIEE-PPP/2025 de la Tesis titulada **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERNADERO INTELIGENTE USANDO IOT PARA LA PRODUCCIÓN CONTINUA Y SOSTENIBLE DE CEBOLLA CHINA EN LA LOCALIDAD DE TAQUIA EN EL DEPARTAMENTO DE AMAZONAS.**, presentado por el bachiller RUBEN SANDRO SANTILLÁN SALAZAR, para optar al título profesional de Ingeniero Electrónico. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 3% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Electrónico.

Lima, 06 de Enero del 2026

Firma del Asesor

DNI: 01292577

Nombres y apellidos del asesor:

CARLOS ALBERTO MORENO PAREDES

DEDICATORIA

A mis padres, Gilberto y Gabriela, por su amor, sacrificio y constante apoyo en cada paso de mi vida.

A mis hermanas, Yboni y Liliana, por su cariño incondicional y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, Gilberto y Gabriela, por su amor incondicional, por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia, y por estar siempre a mi lado, incluso en los momentos más difíciles. A mis hermanas, por su compañía, sus palabras de aliento y por ser parte fundamental en mi vida.

Asimismo, extiendo mi sincero reconocimiento al Dr. Carlos Alberto Moreno, quien, como asesor de tesis, me brindó una guía invaluable, con paciencia, rigor académico y compromiso. Su orientación fue clave en el desarrollo de este trabajo y en mi crecimiento como profesional.

RESUMEN

La cebolla china (*Allium fistulosum*) es un cultivo de ciclo corto (40–45 días), lo que permite un rápido retorno de inversión y la convierte en una de las hortalizas más cultivadas en la localidad de Taquia, Chachapoyas. Sin embargo, su producción se ve afectada por las condiciones climáticas estacionales: en la época seca, el riego por aspersión conlleva un elevado desperdicio de agua, agravando la escasez del recurso en la zona y dificulta el sembrío continuo de cebolla china.

Esta investigación tiene como objetivo diseñar e implementar un invernadero automatizado de 25 m² mediante un sistema IoT. El sistema está basado en un microcontrolador ESP32 como nodo inteligente, que recibe datos de sensores de humedad del suelo (FC-28), temperatura (DHT22) y luminosidad (BH1750), y controla actuadores como una válvula solenoide, un ventilador y una cinta LED. La arquitectura integra una base de datos MongoDB y un servidor backend para almacenamiento y procesamiento de datos, los cuales se transmiten al frontend en tiempo real mediante WebSocket, visualizándose en un dashboard.

La implementación permitió aumentar la producción de cebolla china en un 33 % respecto al cultivo a cielo abierto y consumo de agua de 2,048 L durante todo el ciclo. En una proyección de un invernadero de 250m² se estima que el consumo de agua para riego sería un 70 % menos y considerando un escenario optimista, la ganancia neta puede ser hasta del 66 % por ciclo, con una recuperación de la inversión en tan solo dos ciclos. Estos resultados evidencian el potencial del IoT para optimizar cultivo de hortalizas.

Palabras Clave: Invernadero, IoT, cebolla china, cultivo, cosecha

ABSTRACT

Chinese onion (*Allium fistulosum*) is a short-cycle crop (40–45 days), which allows a rapid return on investment and makes it one of the most widely cultivated vegetables in the locality of Taquia, Chachapoyas. However, its production is affected by seasonal climatic conditions: during the dry season, overhead irrigation leads to significant water waste, worsening resource scarcity in the area and hindering the continuous cultivation of Chinese onion.

This research aims to design and implement a 25 m² automated greenhouse using an IoT-based system. The system is built around an ESP32 microcontroller as the intelligent node, receiving data from soil moisture sensors (FC-28), temperature (DHT22), and light intensity (BH1750), and controlling actuators such as a solenoid valve, a fan, and an LED strip. The architecture integrates a MongoDB database and a backend server for data storage and processing, with real-time transmission to the frontend via WebSocket, allowing visualization through a dashboard.

The implementation increased Chinese onion yield by 33% compared to open-field cultivation, with a total water consumption of 2,048 L during the entire cycle. In a projected 250 m² greenhouse, water consumption is estimated to be 70% lower, and under an optimistic scenario, the net profit may reach up to 66% per cycle, with investment recovery in just two cycles. These results prove the potential of IoT to improve vegetable crop production.

Keywords: Greenhouse, IoT, Chinese onion, cultivation, harvesting

INDICE GENERAL

CARATULA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INDICE GENERAL	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xiii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	15
1.1. Planteamiento del Problema	18
1.1.1. Determinación del Problema	18
1.1.2. Formulación del Problema	21
1.1.3. Problemas Específicos	21
1.2. Objetivos	21
1.2.1. Objetivo General	21
1.2.2. Objetivos Específicos	21
1.3. Importancia y Alcance de Estudio	22
1.4. Limitaciones de Estudio	23
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	25
2.1. Marco teórico	25
2.1.1. Cultivo de Cebolla China	25
2.1.2. Morfología	25
2.1.3. Fenología	26
2.1.4. Factores Edafoclimáticos	27
2.1.5. Enfermedades de la Cebolla China	28
2.1.6. Invernaderos	30
2.1.7. Tipos de Invernaderos	31
2.1.8. Materiales	33
2.1.9. Orientación de un Invernadero	36
2.1.10. IoT	38
2.1.11. Importancia del IoT	39
2.1.12. Componentes de un Sistema IoT	40
2.1.13. Dispositivos Físicos	40

2.1.14.	Sistemas Embebidos	46
2.1.15.	Conectividad	49
2.1.16.	Plataforma de Gestión de Datos	51
2.2.	Antecedentes de Estudio	53
2.2.1.	Antecedentes Nacionales	54
2.2.2.	Antecedentes Internacionales	54
2.3.	Bases Teóricas	56
2.3.1.	MAD	56
2.3.2.	Arquitectura del IoT	56
2.3.3.	Aplicación del IoT en la Agricultura	58
2.3.4.	Sistemas de Control	60
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES		63
3.1.	Hipótesis	63
3.1.1.	Hipótesis General	63
3.1.2.	Hipótesis Específicas	63
3.2.	Variables	64
3.2.1.	Variables Independientes	64
3.2.2.	Variables Dependientes	64
3.2.3.	Variables Externas	65
3.3.	Operacionalización de Variables	65
3.4.	Indicadores de Evaluación	65
CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS		67
4.1.	Área de Estudio	67
4.2.	Diseño de Investigación	68
4.2.1.	Tipo de Investigación	68
4.2.2.	Nivel de Investigación	68
4.2.3.	Enfoque Metodológico	68
4.3.	Población y Muestra	68
4.4.	Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información	69
4.4.1.	Procedimiento Experimental	72
4.4.2.	Técnicas e Instrumentos de Medición y Control	72
4.4.3.	Calibración de Instrumentos y Respaldo de Datos	73
4.5.	Análisis Estadístico	74
4.5.1.	Preparación de Datos	74
4.5.2.	Estadística Descriptiva	75
4.5.3.	Análisis Financiero	75
CAPÍTULO V: RESULTADOS		76
5.1.	Resultados de la Encuesta Aplicada	76
5.1.1.	Comprobación de la Encuesta	77
5.1.2.	Siembra de Cebolla China en la Localidad de Taquia	78

5.1.3.	Elección de la Cebolla China	78
5.1.4.	Frecuencia de Siembras Anuales.....	79
5.1.5.	Estación Climática de Siembra de la Cebolla China	80
5.1.6.	Limitaciones para la Siembra de Cebolla en la Estación Seca ..	80
5.1.7.	Métodos de Riego	81
5.1.8.	Área Promedio de una Parcela Dedicada al Cultivo de Cebolla China	81
5.1.9.	Cantidad de Bulbos Necesarios para Cultivar una Parcela.....	82
5.1.10.	Índice de Rendimiento de Bulbos Sembrados y Cebolla China Cosechado	83
5.1.11.	Costo Promedio para el Cultivo de Cebolla China de una Parcela	83
5.1.12.	Ganancia Promedio al Cosechar una Parcela de Cebolla China	83
5.1.13.	Precio por Kilogramo de Cebolla China	84
5.1.14.	Principales Problemas para el Cultivo de Cebolla China	84
5.1.15.	Ganancia por Metro Cuadrado.....	85
5.1.16.	Cálculo Aproximado de Riego en la Estación seca en un ciclo de cultivo de cebolla china.....	85
5.2.	Resultados del Cultivo de Cebolla China en Invernadero	86
5.2.1.	Comparación de la Altura de las plantas en la Cosecha de Cebolla China	88
5.2.2.	Comparación del Peso Obtenido en la Cosecha de Cebolla China	89
5.3.	Análisis Económico	90
5.3.1.	CAPEX.....	90
5.3.2.	OPEX	91
5.4.	Análisis de Viabilidad Económica.....	92
5.4.1.	Costo Inicial para la Implementación del Invernadero.....	94
5.4.2.	Costo de Operación por Ciclo de Cultivo (45 días)	94
5.4.3.	Ganancia Neta del Cultivo de Cebolla China Cosechada	95
5.4.4.	Retorno de la Inversión (ROI)	96
5.4.5.	Periodo de Recuperación de la inversión (PRI)	97
5.4.6.	Valor Actual Neto (VAN)	98
5.4.7.	Cálculo de ROI, PRI y VAN Considerando Escenarios	98
5.4.8.	Proyección a 250m ² (área de una parcela)	100
5.4.9.	Cultivo Tradicional vs. Cultivo en invernadero de Cebolla China	103
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN		105
6.1.	Discusión por Objetivos Específicos	105
6.2.	Discusión de las Hipótesis Específicas	107
6.3.	Implicancias técnicas y económicas	108
6.4.	Discusión del Objetivo General	109

6.5.	Discusión de la Hipótesis General	109
6.6.	Fortalezas y limitaciones	109
6.6.1.	Fortalezas	110
6.6.2.	Limitaciones	110
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		111
7.1.	Conclusiones	111
7.2.	Recomendaciones	112
CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA.....		114
CAPÍTULO IX: ANEXOS		122
Anexo A: <i>Diagrama de Gantt para la ejecución del proyecto</i>		122
Anexo B: <i>Factores más importantes en la producción de Cebolla China</i>		123
Anexo C: <i>Requerimientos del Sistema y el Sistema IoT</i>		124
Anexo D: <i>Arquitectura del Sistema IoT</i>		125
Anexo E: <i>Selección y justificación de componentes</i>		128
Anexo G: <i>Elección y justificación de tecnología y protocolo para la capa de comunicación</i>		135
Anexo H: <i>Algoritmos y código</i>		138
Anexo I: <i>Simulación</i>		150
Anexo J: <i>Despliegue de la Aplicación Web</i>		154
Anexo L: <i>Elección y justificación del tipo de Invernadero</i>		169
Anexo M: <i>Implementación del Invernadero</i>		172
Anexo N: <i>Especificaciones Técnicas del Esp32-WROOM-32</i>		178
Anexo Q: <i>Especificaciones Técnicas del Módulos Sensor BH1750</i>		181
Anexo R: <i>Especificaciones Técnica de la Válvula Selenoide 12VDC 1/2"</i>		183
Anexo S: <i>Modelos para Estructurar Base de Datos</i>		184
Anexo T: <i>Código de envió de datos del Esp32 al backend</i>		185
Anexo U: <i>Encuesta aplicada a los agricultores de la localidad de Taquia</i>		186

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Ubicación geográfica de la localidad de Taquia</i>	15
Figura 2 <i>Anexo de Taquia</i>	16
Figura 3 <i>Temperatura media en Chachapoyas</i>	16
Figura 4 <i>Agricultores sembrando papa con lampa</i>	17
Figura 5 <i>Agricultor arando la tierra con yunta</i>	17
Figura 6 <i>Anomalía de lluvias en el departamento de Amazonas abril- setiembre del 2024</i>	19
Figura 7 <i>Diagrama de Ishikawa</i>	20
Figura 8 <i>Planta de Cebolla China</i>	26
Figura 9 <i>Bulbos de cebolla china</i>	26
Figura 10 <i>Semilla sexual de cebolla china</i>	27
Figura 11 <i>Cebolla China con pudrición basal</i>	29
Figura 12 <i>Cebolla China con síntomas de moho blanco</i>	29
Figura 13 <i>Cebolla China con mancha púrpura</i>	30
Figura 14 <i>Invernadero techo puntiagudo</i>	32
Figura 15 <i>Invernadero tipo túnel</i>	32
Figura 16 <i>Invernadero tipo dos aguas</i>	33
Figura 17 <i>Estructura de invernadero de madera</i>	34
Figura 18 <i>Estructura de invernadero de acero galvanizado</i>	35
Figura 19 <i>Invernadero de estructura de Aluminio</i>	35
Figura 20 <i>Orientación del invernadero para mayor captación solar</i>	37
Figura 21 <i>Orientación de un invernadero si existe fuertes vientos</i>	38
Figura 22 <i>Sistema IoT</i>	39
Figura 23 <i>Sensores de temperatura y humedad relativa</i>	41
Figura 24 <i>Sensores de Humedad del Suelo</i>	42
Figura 25 <i>Sensores de temperatura</i>	43
Figura 26 <i>Sensores de luz</i>	44
Figura 27 <i>Válvula Selenoide 12AV 1/2"</i>	45

Figura 28 Ventilador axial para ventilación forzada.....	45
Figura 29 Cinta LED para crecimiento.....	46
Figura 30 Microcontrolador Arduino.....	47
Figura 31 Módulo ESP-WROOM-32.....	48
Figura 32 Tipos de procesamiento de datos.....	52
Figura 33 Arquitectura cloud computing en un invernadero.....	59
Figura 34 Fases para la automatización de un invernadero.....	60
Figura 35 Sistema de control PID.....	61
Figura 36 Gráfica simple de ciclo de histéresis de tiempo vs. humedad.....	62
Figura 37 Ubicación Geográfica del Área de Estudio.....	67
Figura 38 Etapas de Implementación.....	69
Figura 39 Maqueta de invernadero a construir.....	71
Figura 40 Construcción terminada del invernadero.....	72
Figura 41 Estadística 1 de encuesta.....	78
Figura 42 Estadísticas de la encuesta, pregunta 2.....	79
Figura 43 Distribución porcentual de la frecuencia anual de siembra de cebolla china en la localidad de Taquia.....	79
Figura 44 Distribución porcentual de la estación preferente para el cultivo de cebolla china en la localidad de Taquia.....	80
Figura 45 Nube de palabras de Limitaciones de siembra de cebolla china en la localidad de Taquia durante la estación seca.....	81
Figura 46 Gráfica de barras del tamaño de parcelas dedicadas al cultivo de cebolla china en la localidad de Taquia.....	82
Figura 47 Gráfica de barras de la cantidad de bulbos para el cultivo de cebolla china en la localidad de Taquia.....	82
Figura 48 Gráfica de barras del índice de cosecha de cebolla china en la localidad de Taquia.....	83
Figura 49 Gráfica de barras de las dificultades de los agricultores de la localidad de taquia para el cultivo de cebolla china en la localidad de Taquia	85
Figura 50 Dashboard antes de apagar el sistema IoT para la cosecha de cebolla china.....	87
Figura 51 Cebolla China de 45 días.....	88
Figura 52 Tamaño de cebolla china cosechada.....	89

Figura 53 Peso (Kg) de cebolla china cosechada.....	90
---	----

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de invernadero más comunes.....	31
Tabla 2 Materiales usados para la construcción de invernaderos.....	33
Tabla 3 Principales materiales usados en las estructuras de los invernaderos	34
Tabla 4 Comparación entre el vidrio y el plástico	36
Tabla 5 Factores para considerar en la orientación de un invernadero.....	37
Tabla 6 Comparación de características técnicas de sensores de temperatura	43
Tabla 7 Comparación de características técnicas entre los microcontroladores Arduino Uno y ESP32-WROOM-32	48
Tabla 8 Comparación entre tecnologías usada para conectividad en un sistema agrícola.....	49
Tabla 9 Protocolos de comunicación.....	50
Tabla 10 Comparación de Base de Datos SQL y NoSQL	53
Tabla 11 Arquitecturas basadas en el procesamiento de datos de un sistema IoT.....	57
Tabla 12 Operacionalización de Variables	65
Tabla 13 Instrumentos de medición y control de las variables	73
Tabla 14 Parámetros de calibración.....	74
Tabla 15 Comparación descriptiva convencional vs IoT de cebolla china....	76
Tabla 16 Estadísticos descriptivos de la encuesta (n=52).....	77
Tabla 17 Límites y MAD	77
Tabla 18 Costo de Capital (CAPEX)	90
Tabla 19 OPEX (Costos operativos)	91
Tabla 20 Eventos importantes que pueden influir en el precio de la cebolla china	93
Tabla 21 Escenarios de precios de la cebolla china.....	93

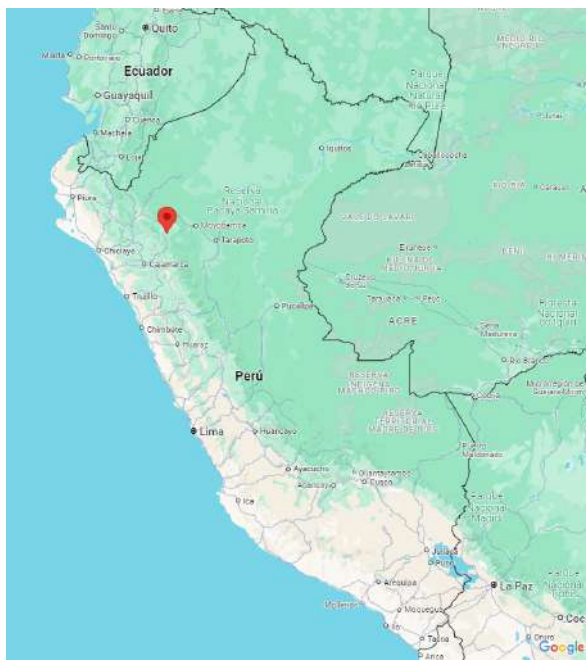
Tabla 22 Inversión Inicial del Invernadero	94
Tabla 23 Consumo de electricidad kWh del sistema IoT.....	95
Tabla 24 Gasto invertido en un ciclo de cultivo de cebolla china	95
Tabla 25 Ganancia neta de 8 ciclos de cultivo de cebolla china	96
Tabla 26 Cálculo por ciclo de cultivo (mes y medio) del retorno de inversión (ROI) y periodo de retorno de la inversión (PRI) considerando escenarios .	99
Tabla 27 Ganancia neta anual por escenarios	99
Tabla 28 Gastos iniciales para un invernadero de 250m ²	101
Tabla 29 Proyección proporcional de gastos en un invernadero de 250m ²	102
Tabla 30 Escenarios de ganancia de la cebolla china en la proyección de un invernadero de 250m ²	102
Tabla 31 Cálculo de ROI y PRI para un invernadero de 250 m ²	103
Tabla 32 Comparación de cultivo tradicional vs. cultivo en invernadero de cebolla china	104

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El anexo de Taquia, con una población de 72 habitantes, pertenece al distrito de Chachapoyas, provincia de Chachapoyas, departamento de Amazonas (ver Figura 1 y Figura 2) se ubica en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, dentro de la ecorregión Quechua, a 2402 msnm. La región posee un clima templado y húmedo. La temperatura mínima promedio es de 13°C, la temperatura máxima es de 24°C (ver Figura 3) y la humedad relativa es de 80%. Durante el año se distingue dos estaciones: una estación lluviosa (de noviembre a abril) y una estación seca (de mayo a setiembre).

Figura 1

Ubicación geográfica de la localidad de Taquia

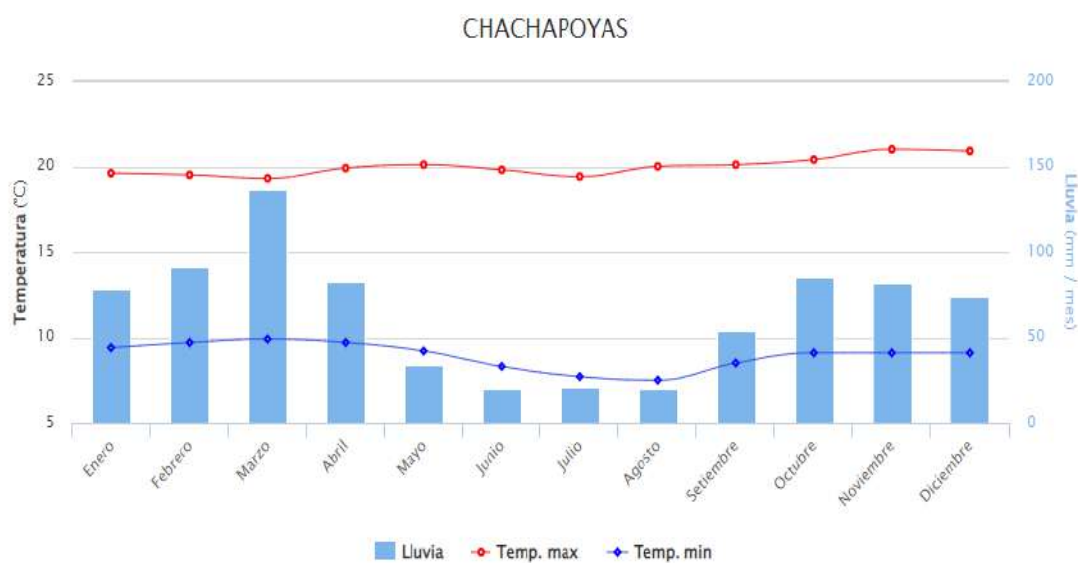


Nota. Adaptado de Google Maps, 2025

(<https://www.google.com/maps/place/Taquia+01000/@-6.2547817,-77.8538975,14z/>). Todos los derechos reservados por Google.

Figura 2*Anexo de Taquia*

Nota: Elaboración propia

Figura 3*Temperatura media en Chachapoyas*

Nota. Adaptado de SENAMHI, n.d.

(<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=amazonas&p=pronostico-detalle>). Todos los derechos reservados por SENAMHI.

La principal actividad económica de los pobladores del anexo de Taquia, al igual que todos los anexos del distrito de Chachapoyas, es la agricultura. Los cultivos predominantes son las hortalizas, en las que se puede mencionar: la cebolla china, espinacas, zanahorias, lechugas, repollo, brócoli, papas, entre otros. Los agricultores de este anexo mantienen la práctica de agricultura tradicional por lo que dependen totalmente de las condiciones ambientales. Sus métodos de cultivo constan esencialmente del uso de la lampa y el uso de la yunta (ver Figura 5) para labrar y sembrar.

Figura 4

Agricultores sembrando papa con lampa



Nota. Elaboración propia

Figura 5

Agricultor arando la tierra con yunta



Nota. La forma tradicional de cultivar los terrenos en la localidad de Taquia es el arado utilizando la yunta. Elaboración propia

1.1. Planteamiento del Problema

1.1.1. Determinación del Problema

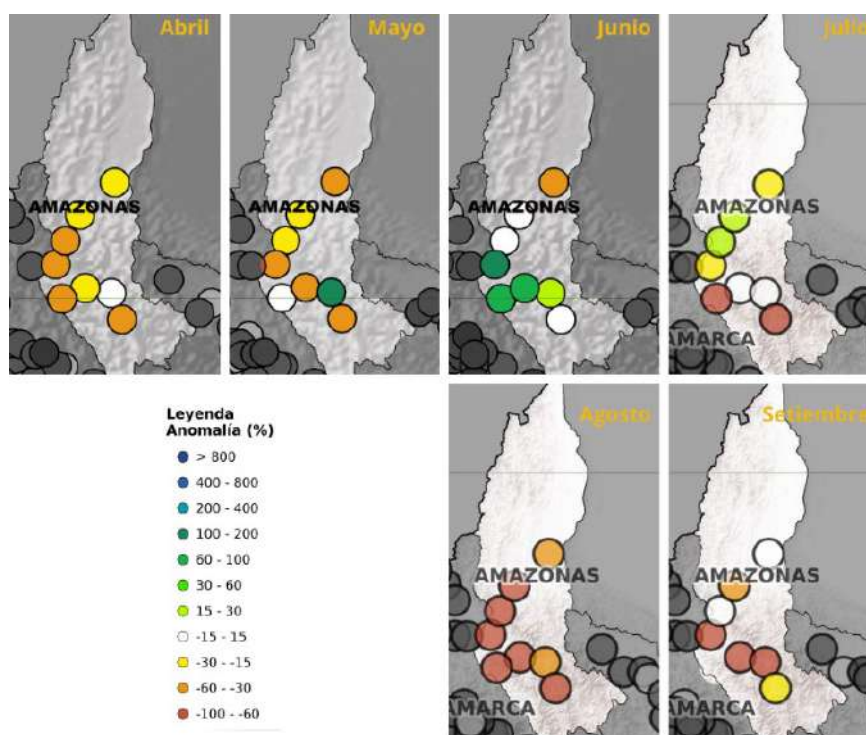
La ciudad de Chachapoyas, capital del distrito de Chachapoyas inicialmente obtenía agua de los dos ríos principales del distrito. Sin embargo, debido al crecimiento de la demográfico, estas fuentes fluviales ya no eran suficientes para satisfacer a toda la ciudad. En consecuencia, se establecieron puntos de captación en los manantiales que abastecen a los anexos cercanos a la ciudad, incluyendo el anexo de Taquia, esto disminuye parcialmente la disponibilidad de agua en estas zonas.

Históricamente la estación seca se caracteriza por lluvias esporádicas; sin embargo, en los últimos años las sequías se han prolongado significativamente durante esta estación. Un caso reciente es el año 2024, en el cual la sequía se prolongó desde el mes de abril hasta el mes de setiembre. En la Figura 6 se observa las anomalías de precipitaciones durante esos meses en el departamento de Amazonas, las cuales se presentaron entre los meses de abril y setiembre del año 2024, La figura nos indica que la ausencia de lluvia en estos meses alcanzó anomalías de hasta el -100%, lo que significa ausencia total de lluvia en comparación a las precipitaciones de los últimos 30 años en el mismo periodo del año.

Esto ha provocado la disminución significativa de los caudales de los ríos y manantiales, lo que a su vez ha generado insuficiencia en el abastecimiento en la ciudad y en los anexos. Los pobladores del distrito de Chachapoyas, como se ha indicado previamente, se dedican principalmente a la agricultura. La ausencia de lluvias les ha generado doble problemática: la necesidad de implementar sistemas de riego para evitar la pérdida de los cultivos y la insuficiencia de agua que compromete la eficacia de estos mismos sistemas de riego. Esta situación genera preocupación constante en la comunidad, afectando no solo la producción agrícola sino también la disponibilidad de agua para uso doméstico. Además, la escasez hídrica obliga a los agricultores a buscar alternativas más eficientes y sostenibles en el manejo de recursos

Figura 6

Anomalía de lluvias en el departamento de Amazonas abril-setiembre del 2024



Nota. Imagen adaptada de SENAMHI, 2025

(<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=amazonas&p=condiciones-climaticas>). Todos los derechos reservados por SENAMHI.

Los agricultores cuyas áreas de cultivo se encuentran próximas al origen de las vertientes de agua pueden tener acceso preferencial al agua, permitiéndoles mantener sus actividades agrícolas, por el contrario, los que tienen sus áreas de cultivo más lejanas se ven obligados a reducir sus áreas de cultivo por insuficiencia de agua para los sistemas de regadío afectando negativamente sus ingresos económicos.

Además de la cantidad de agua limitada, se suma las prácticas ineficientes de los sistemas de riego de los agricultores de Taquia. El riego se realiza por aspersión sin un control adecuado del consumo de agua, por lo tanto, el agricultor regará hasta que subjetivamente le parezca suficiente, sin tener en cuenta los requerimientos de cada cultivo. Esto puede generar un consumo excesivo de agua innecesario e incluso podría afectar el desarrollo de los

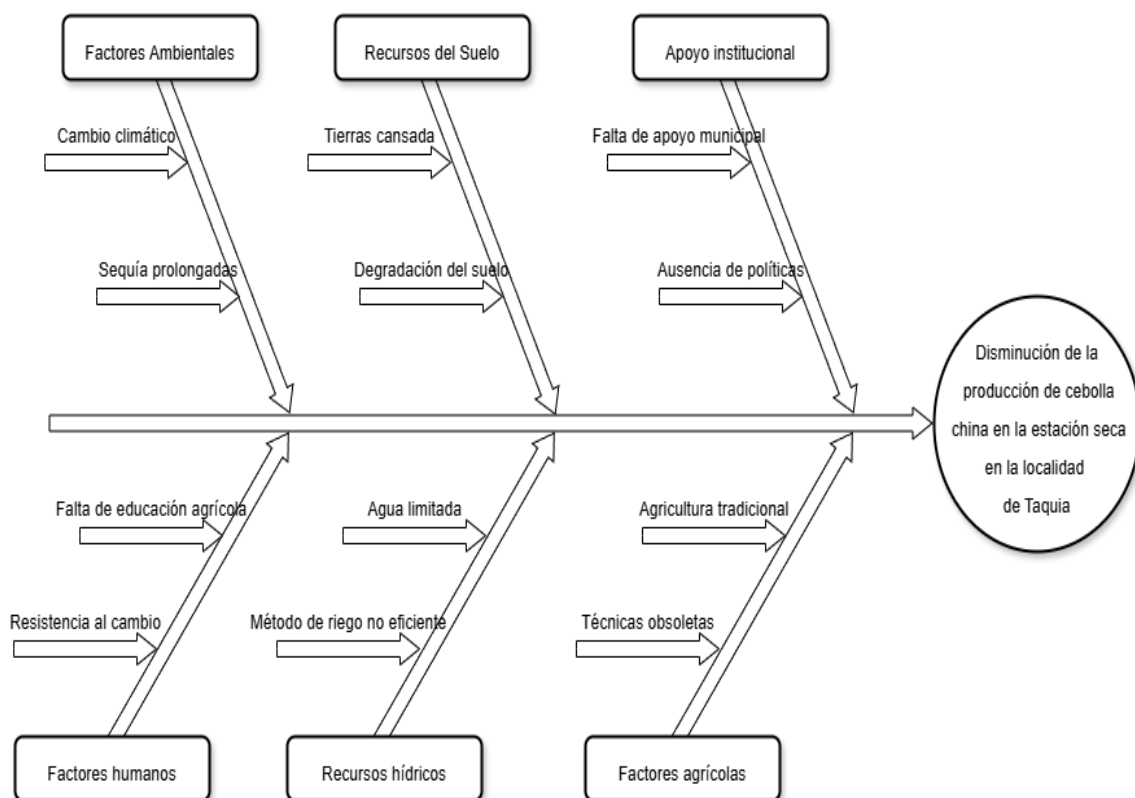
cultivos por exceso de humedad, afectando la cantidad y calidad de la cosecha.

En cuanto al apoyo institucional, la localidad(anexo) de Taquia, así como anexos contiguos enfrentan un escenario de abandono, caracterizado por falta de políticas de apoyo y ausencia de programas de capacitación que reduzcan los efectos negativos en la producción agrícola durante la estación seca. Asimismo, la falta de iniciativa por parte de los propios agricultores de emprender acciones para impulsar estrategias de solución y apoyo en este aspecto ha provocado que la disminución de producción agrícola en la estación seca sea constante en los últimos años.

En la Figura 7 se muestra el diagrama de Ishikawa resumiendo las posibles causas del problema que atraviesa la localidad de Taquia durante la estación seca.

Figura 7

Diagrama de Ishikawa.



Nota. Elaboración propia

1.1.2. Formulación del Problema

¿De qué manera se puede optimizar el consumo de agua por riego y mantener la producción continua de cebolla china en la localidad de Taquia, en el distrito de Chachapoyas, provincia de Chachapoyas, departamento de Amazonas?

1.1.3. Problemas Específicos

1. ¿Cuáles son los factores climáticos más importantes que pueden mejorar la producción de cebolla china en la localidad de Taquia?
2. ¿Cómo diseñar un sistema de invernadero inteligente de bajo costo que satisfaga los factores más importantes que mejoren las condiciones para el cultivo de cebolla china?
3. ¿Cómo implementar un prototipo de invernadero inteligente de bajo costo que mejore la producción de cebolla china en el anexo de Taquia?
4. ¿Cuál es la viabilidad económica del uso de invernaderos inteligentes para el uso eficientemente del agua por riego y la producción de cebolla china en el anexo de Taquia?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un invernadero inteligente para la producción continua de cebolla china y que permita el control del consumo de agua por riego en la localidad de Taquia, distrito de Chachapoyas, provincia de Chachapoyas, departamento de Amazonas.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Determinar los factores más importantes que mejoren la producción de

cebolla china en un invernadero en el anexo de Taquia.

2. Diseñar un sistema de invernadero inteligente de bajo costo para satisfacer los factores más importantes que mejoren las condiciones para el cultivo continuo de cebolla china.
3. Implementa un prototipo de invernadero inteligente para el cultivo continuo de cebolla china durante todo el año.
4. Analizar la viabilidad económica en el uso de invernadero inteligente de bajo costo para el consumo eficiente de agua y mejorar la calidad de producción de cebolla china en la localidad de Taquia.

1.3. Importancia y Alcance de Estudio

La principal actividad económica de la localidad de Taquia es la agricultura, por lo que sus ingresos están directamente relacionados con la cantidad y calidad que puedan cosechar, ya sea cebolla china u otras hortalizas que puedan cultivar.

Históricamente, el clima de la región se ha caracterizado por su estabilidad, lo cual permitía a los agricultores gestionar sus ciclos de siembra, selecciona el cultivo a sembrar y determinar la ubicación más favorable para sembrar, permitiéndoles así anticiparse y aprovecharse de las condiciones climáticas. Sin embargo, actualmente la región se enfrenta a una creciente variabilidad climática, por lo tanto, un invernadero automatizado es capaz de crear un ambiente óptimo para el cultivo de cebolla china u otras hortalizas.

Se propone implementar la agricultura basada en invernadero para un control del consumo de agua en las actividades de riego, con lo que se puede crear sistemas de riego que funcionen de forma eficiente, donde cada planta recibe exactamente lo que necesita, en consecuencia, se reduce el desperdicio de agua. Al optimizar el consumo de agua, la disponibilidad de agua puede alcanzar a más agricultores tanto para el uso doméstico como para el uso agrícola.

Esta implementación garantizaría la producción a lo largo de todo el año y no

solo en estaciones predeterminadas.

1.4. Limitaciones de Estudio

- El experimento se desarrolló durante un único ciclo de cultivo de 45 días, debido a que la implementación se realizó como parte de un proyecto académico de duración limitada. Además, el autor no reside en la zona de estudio, lo que dificultó la ejecución de múltiples ciclos experimentales en campo. Por ello, los resultados podrían variar si se replican en otras ubicaciones geográficas.
- Las dimensiones del invernadero fueron de 3×8.5 metros (25 m^2), definidas en función del presupuesto disponible. Esta escala reducida permitió evaluar la viabilidad técnica del sistema sin comprometer recursos significativos, lo cual resultó conveniente ante posibles fallos o ajustes durante la fase de prueba. En consecuencia, las proyecciones realizadas para una implementación a mayor escala (250 m^2) pueden considerarse viables y representativas, ya que se basan en un modelo funcional validado técnicamente y permiten extrapolar los datos obtenidos con un grado razonable de aproximación.
- El sistema de control implementado se basa en un esquema de histéresis, seleccionado por su simplicidad y facilidad de programación. No obstante, sistemas de control más avanzadas como lógica difusa, control PID o control en cascada, podrían optimizar aún más el uso de recursos.
- La selección de materiales y componentes para la construcción del invernadero y del sistema IoT se realizó priorizando la disponibilidad local, el bajo costo y la durabilidad. Esto puede afectar positiva o negativamente la replicabilidad exacta del sistema en otras zonas con diferente contexto logístico o económico.
- No se efectuó una medición específica del ahorro energético ni del impacto ambiental del sistema, debido a la falta de instrumentación especializada. No obstante, se estima que la automatización contribuye a la reducción del desperdicio de agua, lo que representa un beneficio potencial en términos

de sostenibilidad.

- De 55 familias de la localidad de Taquia se encuestaron 52 (94,5 % de cobertura), lo que minimiza el error de muestreo, pero no elimina un posible sesgo de respuesta de los agricultores.
- La medición de temperatura, humedad y flujo de agua depende de sensores con márgenes de error intrínsecos. Estas tolerancias podrían desplazar ligeramente los valores calculados de rendimiento y consumo de agua.

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Cultivo de Cebolla China

La cebolla china (*Allium fistulosum* L.), en algunos países conocido como cebolleta, cebolla de primavera, cebolla galesa, cebolla de verdeo, cebolla larga, cebolla cambray, entre otros. Cabe resaltar que es una especie originaria de Asia que actualmente es ampliamente cultivada en todo el mundo para ser cosechada por sus hojas y pseudotallos tiernos. Su uso principal es medicinal y culinario. Debido a su sabor suave y aroma característicos es usado como: condimento, decoración, rellenos y salteados. En la medicina tradicional destaca por sus propiedades digestivas, antibacteriana, antioxidante y antiinflamatoria.

Además, es una especie notablemente capaz de adaptarse a diversas condiciones de suelo y clima, lo que ha favorecido su cultivo y expansión a escala mundial en distintas regiones agrícolas. Gracias a esta adaptabilidad, hoy en día existen numerosas variedades de cebolla china, presentando diferencias en aspecto y resistencia a factores ambientales. (Huaraca Ramos, 2015)

2.1.2. Morfología

La planta de cebollita china está formada por las siguientes partes: hojas, son cilíndricas, huecas y erectas, tallo, pseudotallo y raíz (Ver Figura 8). Posee raíces adventicias fibrosas alcanzando 25 cm distribuido por un área de 15

cm alrededor de la planta. (Pérez Panduro, 2021)

Figura 8

Planta de Cebolla China



Nota. Reproducido de “Cebolla China”, por Pachafresco, n.d. (<https://www.pachafresco.com/product-page/cebolla-china>). Todos los derechos reservados por Pachafresco.

2.1.3. Fenología

La cebolla china se puede cultivar a partir de la semilla vegetativa o bulbos (ver Figura 9) o de la semilla botánica o sexual (ver Figura 10). La etapa de germinación dura de 7 a 14 días, la etapa de desarrollo toma entre 30 a 40 días. (Calua Chuquimango, 2016)

Figura 9

Bulbos de cebolla china



Nota. Elaboración propia

Figura 10

Semilla sexual de cebolla china.



Nota. Reproducido de “Semillas secas de cebollino chino”, por Made in China, 2025 (https://es.made-in-china.com/co_onlyherb/product_Dry-Natural-Tuber-Onion-Seed-Leek-Seedad-Dried-Green-Chinese-Chive-Seed_uooiigiosg.html). Todos los derechos reservados

2.1.4. Factores Edafoclimáticos

Suelo. Los suelos francos a francos-arenosos son los más ideales para la cebolla china. No se debe cultivar en suelos arcillosos, y suelos mal drenados ya que fomentan a las enfermedades y reducen el rendimiento (Calua Chuquimango, 2016). La región de Chachapoyas posee un suelo adecuado para el cultivo de cebolla china ya que presenta un suelo franco arenoso-arcilloso (60% de arena, 30% de arcilla y 10% de limo). (Hernando Núñez del Prado Simons, 2018)

PH. Para un buen desarrollo de la cebolla china el pH debe estar entre 6.2 a 6.8, y adicionar compuestos orgánicos para mantener la productividad y la fertilidad (Calua Chuquimango, 2016). En la región de Chachapoyas los suelos suelen tener un pH que varía de 5.0 a 6.5, lo que implica que algunos terrenos suelen ser ligeramente ácidos y no son aptos para el cultivo de cebolla china. (Oliva Cruz et al., 2017)

Temperatura. La cebolla china es un cultivo de climas fríos, pero se han realizado modificaciones genéticas que permite que se pueda desarrollar en un amplio rango de temperaturas. Aun así, el rango de temperatura en el cual se ha observado un mejor desarrollo es en el rango de 12.8°C a 24°C (Huaraca Ramos, 2015). En el distrito de Chachapoyas la temperatura promedio varía de 13°C a 24°C, rango idóneo para el cultivo de cebolla china.

Humedad. La humedad del suelo debe ser uniforme sin llegar a la sequía o al encharcamiento. Se recomienda que la humedad se mantenga entre 50 y 75% de humedad

Luz. Requiere entre 12 a 16 horas de luz. Cuanto mayor es la duración del día, las hojas alcanzan mayor tamaño. (Calua Chuquimango, 2016)

Altitud. La gran mayoría de las variedades de cebolla china se puede cultivar de 0 msnm y 3000 msnm. Chachapoyas al encontrarse a 2340 msnm, por lo que se encuentra en una altitud aceptable para el cultivo de cebolla china.

Precipitación. Se ha observado un óptimo desarrollo de cebolla china en regiones con precipitaciones de 100 y 1500 mm. El clima de Chachapoyas es considerado moderadamente lluvioso con precipitaciones promedio de 777.8 mm anuales. (IGP, n.d.)

2.1.5. Enfermedades de la Cebolla China

Pudrición Basal (*Fusarium Oxysporum* f.sp. *Cepae*). La causa de esta enfermedad es un hongo del género *Fusarium*, el cual prospera principalmente en suelos con exceso de humedad y drenaje deficiente, condiciones que favorecen su desarrollo y persistencia en el cultivo. La cebolla china afectada presenta síntomas como amarillamiento y marchitez progresiva de las hojas, reducción del vigor en la planta, y decoloración grisácea o blancuzca en el tallo, que puede acompañarse de pudriciones en raíces y bulbos. Estos síntomas típicos, tal como se muestra en la Figura 11, indican el avance de la infección y la pérdida de vitalidad en el cultivo, siendo fundamental el manejo y control preventivo de la enfermedad. (CABI, 2021)

Figura 11

Cebolla China con pudrición basal



Nota. Reproducido de “Pudrición Basal”, por CABI, 2021, (<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.24624>). Todos los derechos reservados por CABI.

Moho Blanco (*Sclerotium Cepivorum*). Causado por la proliferación del hongo *Sclerotium Cepivorum* debido a suelos húmedos y fríos, ver Figura 12. Se puede controlar evitando el riego en exceso, y evitando suelo con historial de moho blanco.(INTAGRI, n.d.)

Figura 12

Cebolla China con síntomas de moho blanco



Nota. Reproducido de “Pudrición blanca (*Sclerotium cepivorum*) en el cultivo de cebolla”, por INTAGRI, n.d. (<https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/pudricion-blanca-sclerotium-cepivorum-en-el-cultivo-de-cebolla>). Todos los derechos reservados por INTAGRI.

Mancha Púrpura (Alternaria Porri). Es causada por el hongo *Alternaria Porri*, debido a altas temperaturas y alta humedad. Las primeras manifestaciones de la enfermedad suelen afectar a las hojas, donde aparecen manchas alargadas desde las puntas hacia abajo con centro oscuro y bordes púrpuras (ver Figura 13). Se recomienda riego por aspersión en exceso para su proliferación. (INVESA, n.d.)

Figura 13

Cebolla China con mancha purpura



Nota. Reproducido de “Mancha Purpura”, por Invesa, n.d.

(<https://www.invesa.com/product/mancha-purpura/>). Todos los derechos reservados por Invesa.

2.1.6. Invernaderos

Un invernadero es una estructura cubierta con plástico o vidrio diseñada con el objetivo de proteger a plantas o cultivos de las condiciones climáticas externas que podrían afectar negativamente su desarrollo. Esta protección permite el cultivo en un ambiente controlando, favoreciendo el crecimiento

continuo y eficiente. (Serrano Cermeño, 2005)

2.1.7. Tipos de Invernaderos

Existen diferentes tipos de invernadero, los cuales pueden clasificarse según diversos criterios. La Tabla 1 se muestra los invernaderos más comunes clasificados de acuerdo con el tipo de estructura.

Tabla 1

Tipos de invernadero más comunes

Tipo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Túnel (ver Figura 15)	Estructura curvada que va desde el suelo hasta la cumbre. Apto para climas templados.	❖ Fácil de construir ❖ Bajo costo ❖ Resistente al viento	❖ Es para área de cultivos pequeña. ❖ Necesita mucho film para la cubierta. ❖ No permite la agricultura vertical
Capilla	Arco redondo con paredes laterales verticales	❖ Mejor circulación del aire. ❖ Mayor espacio interior utilizable.	❖ Mayor costo que el tipo túnel. ❖ Mayor exposición al aire.
Dos aguas o techo de silla (ver Figura 16)	Techo inclinado simétrico en forma de "V", ideal para zonas lluviosas o se requiera buena ventilación.	❖ La inclinación del techo permite fácil drenaje de la lluvia. ❖ Su forma permite construir de diversos tamaños. ❖ Ventanas en la cumbre permite un eficiente flujo de aire.	❖ Alto costo. ❖ Requiere mucho material para la cobertura.
Diente de sierra	Estructura asimétrica, con techo inclinado hacia un lado. Es ideal para climas húmedos y/o cálidos.	❖ Mejora la ventilación natural. ❖ Reducción de la acumulación del calor.	❖ Alto costo ❖ Construcción compleja. ❖ Ventilación insuficiente en regiones sin viento

Tipo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Techo puntiagudo (Ver Figura 14)	Arco puntiagudo con pared lateral inclinada. Es ideal para regiones lluviosas, vientos fuertes y/o alta condensación.	❖ Evita que la condensación de agua caiga sobre los cultivos. ❖ Resistencia al viento. ❖ Mejora la circulación del aire interno.	❖ Alto costo y construcción compleja.

Nota. Elaboración propia en base a von Zabeltitz (2011)

Figura 14

Invernadero techo puntiagudo



Nota. Reproducido de “Commercial Greenhouses”, por *Planta Greenhouses*, n.d. (<https://plantagreenhouses.com/collections/commercial-greenhouses>).

Todos los derechos reservados por Planta Greenhouse

Figura 15

Invernadero tipo túnel



Nota. Reproducido de “Commercial Greenhouses”, por *Planta Greenhouses*, n.d. (<https://plantagreenhouses.com/collections/commercial-greenhouses>).

Todos los derechos reservados por Planta Greenhouse

Figura 16*Invernadero tipo dos aguas*

Nota: Reproducido de “Alfordson Greenhouse aluminium polycarbonatel” por Alfordson, n.d. (<https://www.alfordson.com.au/alfordson-greenhouse-aluminium-polycarbonatel-gard~203780>). Todos los derechos reservados por Alfordson®

2.1.8. Materiales

Los materiales que se emplean para la construcción de un invernadero dependen de varios factores, como el tipo de estructura, el clima y el presupuesto del proyecto. En la Tabla 2, podemos resumir los materiales más comunes usados en la construcción de invernaderos.

Tabla 2*Materiales usados para la construcción de invernaderos*

Estructura	Cubierta	Ventilación
❖ Madera		❖ Pantalla de mallas
❖ PVC	❖ Vidrio	❖ Ventiladores mecánicos
❖ Acero galvanizado	❖ Plástico	

Nota. Elaboración propia en base a von Zabeltitz (2011)

Estructura de un Invernadero. En la Tabla 3 presentamos una tabla comparando los principales materiales usados en la estructura de un invernadero.

Tabla 3*Principales materiales usados en las estructuras de los invernaderos*

Material	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Madera (Ver Figura 17)	Bajo costo Fácil de instalar	Vida útil corta Requiere mantenimiento	Pilares, vigas y tijeras
Acero galvanizado (Ver Figura 18)	Vida útil larga Casi no requiere mantenimiento	Alto costo Genera peso a la estructura	Pilares, vigas, tijeras, arcos
Aluminio (Ver Figura 19)	Ligero Vida útil larga Fácil de instalar	Mas caro que el acero galvanizado	Pilares, vigas argos

Nota. Elaboración propia en base a von Zabeltitz (2011)

En la Figura 17 se observa el armazón del invernadero construido con madera, lo que representa una alternativa accesible para productores locales debido a la disponibilidad del material en la región. El costo de esta estructura suele ser bajo o incluso nulo si se cuenta con acceso directo a árboles o insumos forestales propios, requiriendo principalmente gastos en mano de obra y elementos de fijación.

Figura 17*Estructura de invernadero de madera*

Nota: Resproducido de “Invernaderos de madera”, por Policultivo, n.d.

(<https://policultivo.cl/invernaderos/invernadero-de-madera/>). Todos los derechos reservados por Policultivo.

Figura 18*Estructura de invernadero de acero galvanizado*

Nota. Reproducido por “¿Cómo diferenciar invernaderos baratos frente a uno de calidad profesional?”, por La Tienda del Invernadero, n.d.

(<https://latiendadelinvernadero.com/blog/general/como-diferenciar-invernaderos-baratos-frente-a-uno-de-calidad-profesional>). Derechos reservados por La tienda del Invernadero.

Figura 19*Invernadero de estructura de Aluminio.*

Nota. Reproducido de “Invernaderos Premiun”, por Invernaderos Argentina, n.d. (<https://invernaderosargentina.com>). Todos los derechos reservados por Invernaderos Argentina.

Cubierta de un Invernadero. Para la cubierta de un invernadero, los materiales más usados son el vidrio y las películas plásticas o también llamadas agrofilm. En la Tabla 4 se presentan las diferencias más relevantes entre estos materiales, considerando aspectos como durabilidad, transmisión de luz y costo.

Tabla 4*Comparación entre el vidrio y el plástico*

Característica	Vidrio	Plástico
Durabilidad	Mayor vida útil	De 3 a 4 años
Costo	Alto	Bajo
Transmisión de luz	±88%	±90 (varía según material)
Estructura	Requiere una sólida estructura	No requiere una estructura sólida
Instalación	Proceso de instalación más complicada	Fácil de instalar
Conductividad térmica	0.81 Wm-1K	Varía según el material
Densidad	0.88 kg/m ³	±1100 kg/m ³ (Varía según material)
Coefficiente de transferencia de calor	2.89 Wm-2K	±7 Wm-2K
Emisividad	0.84	Varía según el material
Uso global	Poco	Ampliamente usado

Nota. Adaptado de “Estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático en sistemas de producción agrícola (Edición n°1)”, por Johana et al., 2023, AGROSAVIA Editorial. Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 (CC BY-SA 4.0).

Las películas plásticas o agrofilm se fabrica por un proceso de coextrucción (técnica avanzada para mezclar dos o más materiales para la fabricación de y tricapa, de acuerdo con los aditivos que pueda recibir, la capa externa puede filtrar rayos UV, la capa intermedia es para ser resistente a los rasgados y la tracción, y la capa inferior puede dar características como antigoteo y antiniebla.

2.1.9. Orientación de un Invernadero

La orientación de un invernadero depende de varios factores, los principales se muestran en la Tabla 5, en la mayoría de los casos dependerá de las necesidades de las plantas y el clima de la zona, si se desea mayor luz la orientación debe ser tal que permita mayor captación solar, es decir de este a

oeste Figura 20); sin embargo, si el viento es fuerte en la zona, la orientación debe ser la misma que la dirección más dominante o fuerte del viento (ver Figura 21) para no poner en riesgo la estructura del invernadero. (INTAGRI, 2021)

Tabla 5

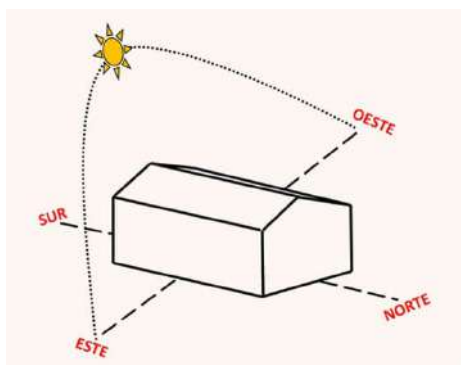
Factores para considerar en la orientación de un invernadero

Factores	Orientación del Invernadero
Radiación solar	En latitudes menos a 40° la orientación debe ser de norte a sur; y superiores, de este a oeste. De esta forma se aprovecha mayor cantidad de luz.
Dirección del viento	El invernadero debe estar en paralelo con la dirección del viento predominante, quedando las ventanas laterales perpendiculares al viento y las cenitales en paralelo. Ver Figura 21
Tipo de cultivo	De acuerdo con las necesidades de las plantas a cultivar puede variar la orientación, por ejemplo, si se debe considerar la cantidad de luz que necesita el cultivo

Nota. Información adaptada de “Aspectos a considerar en la orientación de los invernaderos”, por INTAGRI, 2021 (<https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/aspectos-a-considerar-en-la-orientacion-de-los-invernaderos>). Todos los derechos reservados por INTAGRI.

Figura 20

Orientación del invernadero para mayor captación solar



Nota. Reproducido de “Aspectos a considerar en la orientación de los invernaderos”, por INTAGRI, 2021 (<https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/aspectos-a-considerar-en-la-orientacion-de-los-invernaderos>). Todos los derechos reservados por INTAGRI.

Figura 21

Orientación de un invernadero si existe fuertes vientos



Nota. Reproducido de “Aspectos a considerar en la orientación de los invernaderos”, por *INTAGRI*, 2021 (<https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/aspectos-a-considerar-en-la-orientacion-de-los-invernaderos>). Todos los derechos reservados por INTAGRI.

2.1.10. IoT

El IoT (Internet of the things o Internet de las cosas) es un concepto que describe un sistema en el cual cosas(things) están conectadas entre sí a través de internet, relacionándose autónomamente (Ver Figura 22).

La IoT es una red de dispositivos interconectados de tal forma pueda existir una comunicación entre ellos y con otros sistemas a través de internet sin la necesidad de intervención humana.(Lee & Lee, 2015a).

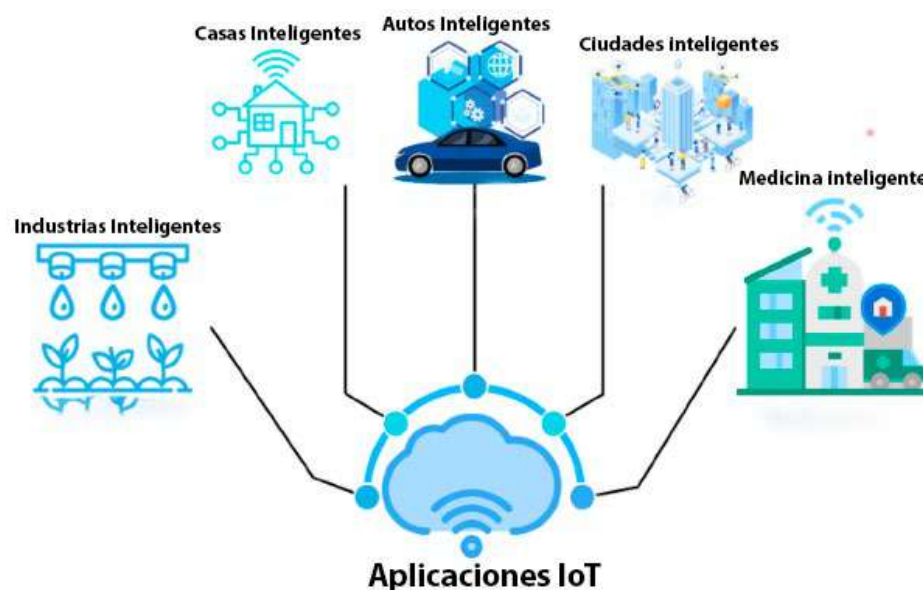
La IoT también puede definirse como una inmensa red basada en internet que interconecta cosas físicas y virtuales con protocolos de comunicación estándar e interoperables. Es decir, todas las cosas, desde un sensor hasta un actuador que posea una entidad y atributos únicos que lo diferencie de los demás, se comunican entre sí para lograr un seguimiento, identificación,

percepción, monitoreo y gestión inteligente a través de diferentes redes en cualquier momento y lugar.(Shi et al., 2019)

La IoT se ha ido integrando en la mayoría de los aspectos de la vida humana, como la atención médica, las casas inteligentes (Smart home), el control industrial, entre otros.(Shi et al., 2019)

Figura 22

Sistema IoT



Nota. Adaptado de “Real-time artificial intelligence based health monitoring, diagnosing and environmental control system for COVID-19 patients”, por Zia Ur Rahman et al., n.d. (https://www.researchgate.net/publication/360960059_Real-time_artificial_intelligence_based_health_monitoring_diagnosing_and_environmental_control_system_for_COVID-19_patients). Bajo licencia CC BY 4.0

2.1.11. Importancia del IoT

El IoT está ganando relevancia en diversas industrias debido a su potencial de transformar múltiples sectores.

En el sector de la salud, el IoT o IoMT (Internet of Medical Things) permite la monitorización remota, personalizada y precisa de pacientes. Mejorando la

calidad de vida del paciente y reduciendo la congestión de los sistemas de salud.(Ishaq & Farooq, n.d.)

En el sector industrial y empresarial, el IoT se ha convertido en un factor vital para el desarrollo de nuevos productos y servicios, mejorando la calidad del producto y aumentando las ganancias.(Lee & Lee, 2015b)

En el sector Cloud Computing, el IoT soluciona problemas relacionados con la adquisición, gestión y tratamiento de cantidades inmensas de datos, lo cual permite un análisis más preciso y provechoso.(Cai et al., 2017)

El IoT es el núcleo en el desarrollo de las ciudades inteligentes, permitiendo la integración, gestión y control de tecnología inteligente con infraestructuras urbanas y servicios.(Kim et al., 2017)

2.1.12. Componentes de un Sistema IoT

Los componentes de comunicación son esenciales para el funcionamiento de un sistema IoT. Estos componentes se comunican entre sí usando protocolos de comunicación, que son estándares de telecomunicación

2.1.13. Dispositivos Físicos

Sensores. Un sensor es un dispositivo responsable de recopilar datos de magnitudes físicas o químicas que son necesarios para la toma de decisiones inteligente.

Sensores de Temperatura y Humedad Relativa. Es un dispositivo que se suele usar en espacios interiores (un invernadero, por ejemplo) para medir la temperatura y la humedad relativa presente en el aire. Estos sensores se basan en un principio capacitivo o resistivo para medir la temperatura y humedad. En la Figura 23 se muestran algunos sensores de temperatura y humedad relativa.

Figura 23*Sensores de temperatura y humedad relativa*

Sensor	Imagen
DHT11	
DHT22	
BME280	
SHT31-D	

Nota. Imágenes adaptadas de Electromania, n.d.

(<https://www.electromania.pe/>). Todos los derechos reservados por Electromania

Sensores de Humedad del suelo. Estos dispositivos se emplean en agricultura de precisión y pueden funcionar bajo distintos principios: el principio capacitivo mide la variación de la constante dieléctrica debida al contenido de agua; el principio resistivo aprovecha los cambios en la resistencia eléctrica entre electrodos vinculados con la humedad; la reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR) emplea barrido de frecuencias para determinar el contenido hídrico; y la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) utiliza pulsos electromagnéticos para medir el tiempo de propagación de señales, con alta precisión en diferentes tipos de suelo. En la Figura 24 se presentan ejemplos de sensores de humedad del suelo disponibles comercialmente.

Figura 24*Sensores de Humedad del Suelo*

Sensores	Imágenes
Capacitivo v1.2	
Resistivo YL-69	
SoilWatch 10	
TEROS 10	

Nota. Imágenes adaptadas de Electromania, n.d.

(<https://www.electromania.pe/>). Todos los derechos reservados por Electromania

Sensores de Temperatura. Estos dispositivos permiten medir la temperatura de objetos, ambientes o sistemas agrícolas con precisión y rapidez. Su funcionamiento puede basarse en varios principios, siendo los más comunes el termopar (que genera una diferencia de potencial proporcional a la temperatura entre dos metales distintos) y el resistivo (donde la resistencia eléctrica de ciertos materiales aumenta o disminuye según la temperatura, como ocurre en los RTD o termistores). Además, existen sensores de temperatura infrarrojos y de circuito integrado (IC) empleados para lecturas directas y remotas en múltiples aplicaciones agrícolas. En la Tabla 6 se muestra una comparación de las características técnicas relevantes de algunos de estos sensores.

Tabla 6*Comparación de características técnicas de sensores de temperatura*

Característica	DS18B20	MAX31850K	PT100	LM35	TMP36
Rango	-55°C a 125°C	-200°C a 700°C	-200°C a 650°C	-55°C a 150°C	-40°C a 125°C
Precisión	±0.5°C	±0.25°C	±0.1°C	±0.5°C	±1°C
Interfaz	One Wire	One Wire/SPI	Analógico	Analógico	Analógico
Resolución	9-12 bits	14 bits	Depende ADC	10 bits	10 bits
Voltaje	3.0-5.5V	3.3-5V	2-5V	4-30V	2.7-5.5V
Impermeabilidad	IP67	IP67	IP68	IP65	IP65
Precio (S/.)	S/. 15- S/. 25	S/. 45 - S/. 60	S/. 80 - S/. 120	S/. 30 - S/. 45	S/. 25 - S/. 38

Nota. Nota. Elaboración propia con datos extraídos de las hojas técnicas disponibles en ALLDATASHEET (n.d.) (<https://www.alldatasheet.com/>). Todos los derechos reservados de ALLDATASHEET (n.d.)

Figura 25*Sensores de temperatura*

Sensor	Imagen
DS18B20	
MAX31850K	
PT100	
LM35	
TMP36	

Nota. Elaboración propia con imágenes adaptadas de Electromania Peru, n.d. (<https://www.electromania.pe/>). Todos los derechos reservados de Electromanía

Sensores de Luz. Es un dispositivo que mide la intensidad de luz en un ambiente. Estos dispositivos basan su funcionamiento en principio fotoeléctricos (pueden ser fotodiodos, fotorresistores, fototransistores, etc.), es decir envían una señal proporcional a la intensidad de luz que reciben. En la Figura 26 se muestran algunos sensores de luz.

Figura 26

Sensores de luz

Sensor	Imagen
BH1750	
TSL2561	
MAX44009	
VEML7700	
LDR (GL5516)	

Nota. Elaboración propia con imágenes adaptadas de Electromania Peru, n.d. (<https://www.electromania.pe/>). Todos los derechos reservados de Electromanía

Actuadores. Un actuador es un dispositivo que actúa o responde en función a una señal de control. A continuación, se mencionan algunos actuadores:

Válvula Selenoide o electroválvula. Es un dispositivo que controla el paso de flujo de líquidos o gases de un sistema (ver Figura 27). Tiene un selenoide el cual genera un campo magnético que activa un émbolo que abre o cierra la válvula cuando recibe una señal eléctrica. Según el tipo de acción que realizan, pueden ser NC (normalmente cerrada) y NO (normalmente abierta), la elección de una válvula selenoide dependerá del tipo de líquido o gas del sistema, si el líquido es caliente o frío, el diámetro de los tubos, entre otros. En el presente trabajo, se requiere una válvula selenoide de 1/2 pulgada para agua fría, normalmente cerrado.

Figura 27*Válvula Selenoide 12AV 1/2"*

Nota. Reproducido de “Válvula Solenoide 12V G1/2 DN15”, por Electromania Peru, n.d. (<https://www.electromania.pe/producto/valvula-solenoide-12v-1-2-fpd-270a/>). Todos los derechos reservados por Electromanía

Ventilador. Un ventilador es un dispositivo mecánico que mediante el giro de sus aspas o palas generan un flujo continuo de aire. De acuerdo con el tipo de ventilador puede redistribuir el aire, renovar el aire o ventilación forzada de un invernadero. En la Figura 28 se observa un ventilador para ventilación forzada dentro de un invernadero, su función es remover el aire caliente dentro del invernadero y reemplazarlo por el aire más fresco del exterior.

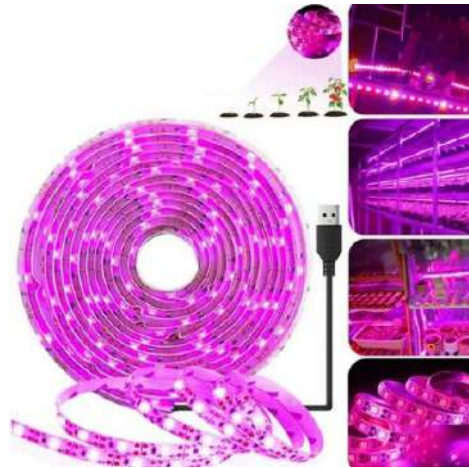
Figura 28*Ventilador axial para ventilación forzada.*

Nota. Reproducido de “Ventilador para invernadero”, de ArchiExpo Connect, n.d. (<https://www.archiexpo.es/fabricante-arquitectura-design/ventilador-invernadero-17708.html>). Todos los derechos reservados por ArchiExpo Connect

Cinta LED. ES un dispositivo que provee luz de espectro completo, es decir imita la luz natural del sol. Lo cual es apropiado para inducir la fotosíntesis en las plantas. Se suele emplear para dar suplencia adicional a las plantas. La longitud de onda del LED necesario para la fotosíntesis es 400 a 520nm del espectro azul y 710 a 720nm para el espectro rojo. En la Figura 29 se muestra una cinta de crecimiento de 460nm de espectro de luz azul, 640nm de espectro de luz roja y 0.24W/LED

Figura 29

Cinta LED para crecimiento



Nota: Reproducido de “Growing Lamps”, por Amazon, 2024

(<https://www.amazon.com/-/es/crecimiento-impermeable-suculentas-hidropon%C3%ADa-invernadero/dp/B0BXFJT8Q8?th=1>). Todos los derechos reservados por Amazon

2.1.14. Sistemas Embebidos

Un sistema embebido es un sistema de computación diseñado para realizar funciones dedicadas en tiempo real. Estos sistemas son programados y ajustados para realizar la función específica para la que fueron creados. (Camara Valencia, n.d.)

Los Arduino, los módulos ESP y Raspberry Pi son módulos electrónicos de bajo costo que son usados en el diseño de sistema embebidos de toda índole.

Estos módulos incluyen accesorios y librerías, que facilitan su implementación para cualquier solución.

Módulo Arduino UNO. Arduino es una placa electrónica (Ver Figura 30) que utiliza un microcontrolador reprogramable basada en hardware y software libre, como el ATmega328P que es el microcontrolador que usa el Arduino Uno.

La gran ventaja de usar un módulo Arduino es su usabilidad, hay una gran comunidad en línea con recursos y es compatible con múltiples sensores y se pueden integrar con módulos adicionales. (Arduino, n.d.-b)

Figura 30

Microcontrolador Arduino



Nota. Reproducido de Arduino UNO R4 Wi-Fi , por Arduino Online Shop, n.d. (<https://store-usa.arduino.cc/products/uno-r4-wifi>). Todos los derechos reservados por Arduino.

Módulo ESP-WROOM-32. Es un módulo que integra el microcontrolador ESP32 (Ver Figura 31), el cual cuenta con conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que lo convierte en una buena opción para aplicaciones IoT debido a su versatilidad, bajo consumo de energía y comunicación inalámbrica. (Espressif, 2023)

Figura 31*Módulo ESP-WROOM-32*

Nota. Reproducido de “Módulo ESP-WROOM-322, por Nanoparuro, n.d. ()).

Todos los derechos reservados por Nanoparuro

En la Tabla 7 se presenta una comparación entre el Arduino Uno y el ESP32-WROOM-32, destacando sus primeras diferencias como capacidad de procesamiento, conectividad, memoria, etc.

Tabla 7

Comparación de características técnicas entre los microcontroladores Arduino Uno y ESP32-WROOM-32

Característica	Arduino Uno	ESP32 WROOM 32
Microcontrolador	ATMega328P (8 bits)	Xtensa Dual Core LX6 (32 bits)
Velocidad de Reloj	16 MHz	Hasta 240 MHz
Memoria Flash	32 KB	4 MB
SRAM	2 KB	520 KB
Pines Digitales	14 pines digitales	34 pines digitales
Entradas Analógicas	6 entradas analógicas	Hasta 18 entradas analógicas
Conectividad	No tiene conectividad inalámbrica; requiere módulos externos	Wi-Fi y Bluetooth integrados
Voltaje de Operación	5V DC	3.3V DC
Consumo de Corriente	45 mA - 80 mA	80 mA - 90 mA

Característica	Arduino Uno	ESP32 WROOM 32
Entorno de Desarrollo	IDE de Arduino	IDE de Arduino, Python, Lua

Nota. Elaboración propia a partir de las especificaciones técnicas del Arduino Uno y el Esp32-wroom-32, de Alldatasheet, n.d. (<https://www.alldatasheet.com/>). Todos los derechos reservados por AlldataSheet

2.1.15. Conectividad

La conectividad es esencial en un sistema IoT, ya que permite la comunicación entre dispositivos que forman parte del sistema. La conectividad está conformada por tecnologías, protocolos y redes que permiten el intercambio de datos de forma eficiente y segura.

Tecnologías. Cuando se habla tecnologías de conectividad nos referimos al medio por el cual se realizará la comunicación. Actualmente han surgido varias tecnologías. Para conectividad inalámbricas, existen tecnologías: Wi-Fi, LPWA (Low Power Wide Area), ZigBee y Bluetooth (Ver la Tabla 8). Para conectividad alámbrica o por cable se suele usar cable Ethernet

Tabla 8

Comparación entre tecnologías usada para conectividad en un sistema agrícola

Tecnología	Velocidad de transmisión	Banda de frecuencia	Rango de transmisión	Consumo de energía
Bluetooth	1-24 Mb/s	24 MHz	8-10 m	Muy baja
LoRa	0.3-50 kb/s	868/900 MHz	<30 km	Muy baja
RFID	40 a 160 kb/s	860-960 MHz	1-5m	Baja
ZigBee	20-250 kb/s	2.4GHz	10-20 m	Baja
Red Celular	200 kb/s (3G) 0.1-1Gb/s	865 MHz, 2.4 GHz	Área de alcance del celular	Baja

Tecnología	Velocidad de transmisión	Banda de frecuencia	Rango de transmisión	Consumo de energía
Wi-Fi	(4G) 1 Mb/s- 7Gb/s	5 GHz -60 GHz	20-100m	Alta

Fuente. Tabla extraída de Bersani et al. (2022)

Protocolos de Comunicación. Los protocolos de comunicación establecen el cómo se realiza el intercambio de datos entre un dispositivo emisor y uno o más dispositivos receptores, en la Tabla 9 se muestran algunos protocolos de comunicación.

Tabla 9

Protocolos de comunicación

Protocolo	Descripción	Aplicación
MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)	Protocolo	Se usan en invernaderos donde los sensores transmiten datos y los actuadores reciben comando a través de un bróker MQTT.
HTTP/HTTPS	Protocolo de transferencia de hipertexto usados para la comunicación entre dispositivos y servidores web.	Permite enviar y recibir datos desde una interfaz web o app móvil, posibilitando el acceso a información en tiempo real.
CoAP (Constrained Application Protocol)	Protocolo de aplicación basado en el modelo cliente-servidor que permite la comunicación entre dispositivos con disponibilidad limitada de energía.	Se usa en aplicaciones que se busque una comunicación eficiente y de bajo consumo

Fuente. Elaboración propia

Redes. Las redes son el entorno físico en el cual los dispositivos se conectan. Las redes determinan la organización, la ubicación y la distancia entre dispositivos. Existen varios tipos de redes: LAN, WAN, PAN y LPWAN.

2.1.16. *Plataforma de Gestión de Datos*

Una plataforma de gestión de datos es un entorno de hardware y que tiene las siguientes fases:

1. Recepción de Datos: Recibe los datos de todos los dispositivos físicos que forman parte del sistema IoT en tiempo real, simultáneamente.
2. Procesamiento de datos: los datos recibidos son ordenados, transformar y organizados para que puedan estar listos para ser analizados.
3. Almacenamiento de datos: los datos procesados son guardados en una base de datos.
4. Distribución de datos: pone a disposición APIs o endpoints para que los datos estén disponibles y puedan ser consumidos por aplicaciones web, móviles y otros.

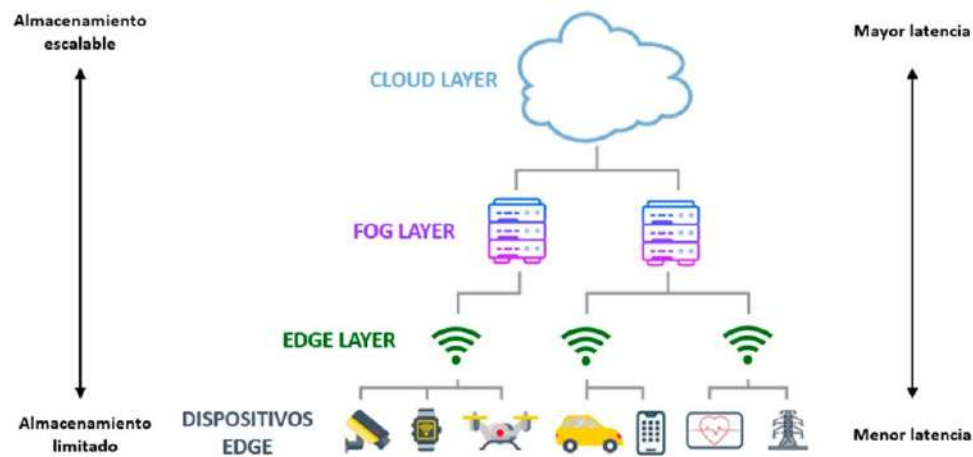
Clasificación de Procesamiento de Datos. Una plataforma de gestión de datos puede clasificarse según dónde y cómo se realice el procesamiento de datos, que use: Edge Computing, Fog Computing y Cloud Computing (Ver Figura 32).

- a) Edge Computing: también llamada computación en el borde, ya que el procesamiento de datos se realiza cerca al origen de estos, en el borde (en el límite) de un sistema IoT, cerca de los sensores y actuadores. Por ejemplo, un sistema IoT en el cual los sensores envían los datos a un microcontrolador, y es en este microcontrolador donde se realiza la recepción y el procesamiento de datos para la toma de decisiones inmediatas y en tiempo real.
- b) Fog Computing: también llamada computación en la niebla (analogía a que las acciones ocurren en una zona media: entre el suelo y las nubes). El procesamiento de datos se realiza en un nivel más alto del Edge Computing, cerca del borde del sistema IoT, pero no en él. Por ejemplo: un sistema IoT en el cual se tienen varios microcontroladores que reciben datos de sus respectivos sensores, cada microcontrolador envía los datos a un Raspberry Pi; este procesa los datos y toma decisiones, y solo la información relevante envía a la nube para que se muestre al usuario final.

- c) Cloud Computing: el procesamiento de datos se realiza en la nube, en servidores remotos. Los datos crudos obtenidos de los sensores son procesados, analizados y almacenados en la nube; desde allí se realiza la toma de decisiones. Aunque la latencia (tiempo entre el envío de un request y la recepción de un response) es superior al procesamiento de datos Edge y Fog Computing y es necesario una conexión a internet constante y estable; sin embargo, la amplia infraestructura y recursos que posee puede procesar y almacenar grandes volúmenes de información (Big Data), ejecutar complejos algoritmos como aprendizaje automático (Machine Learning y Deep Learning).

Figura 32

Tipos de procesamiento de datos



Nota. Adaptado de “Digital y seguro, nuevas ideas en la digitalización de plantas”, por Tapia Fernandez et al., 2024

(<https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/572842-Digital-y-seguro-nuevas-ideas-en-la-digitalizacion-de-plantas.html>). Todos los derechos reservados por Metalmecánica

Base de Datos. Una base de datos es una herramienta que permite almacenar datos de forma ordenada y organizada, de tal manera que la base de datos es fácil de administrar y fácil de acceder a la información.

De acuerdo con la estructura, almacena y accede a la base de datos, puede

ser una base relacional (SQL) y no relacional (NoSQL), en la Tabla 10 se realiza una comparación general.(IThink, n.d.)

Tabla 10

Comparación de Base de Datos SQL y NoSQL

Base de Datos	SQL	NoSQL
Estructura de datos	Los datos se almacenan en tablas de estructura fija y definida, así como los tipos de datos y las relaciones entre tablas.	Los datos se almacenan en documentos flexibles (JSON o BSON) o grafos, con formato clave-valor o nodos(entidad) y aristas(relación) respectivamente.
Relaciones	Cada tabla tiene una clave primaria y una clave foránea que establece la relación entre ellas.	No requieren una relación.
Lenguaje	SQL (<i>Structured Query Language</i>)	Depende de la base de datos.
Ventajas	Este tipo de base de datos usa transacciones ACID (atomicidad, coherencia, aislamiento y durabilidad) que son esenciales para garantizar la consistencia y validez de los datos. Facilidad de manejar datos estructurados y establecer relaciones complejas	Al no ser estrictamente relacionales, son escalables horizontales (una base de datos puede ser distribuida en varios clústeres) y flexibles para manejar variedad de tipo de datos y formatos.
Desventajas	Escalabilidad limitada.	Pueden no tener transacciones ACID completas.
Ejemplos	Oracle, MariaDB, PostgreSQL y MySQL	MongoDB, Redis, Cassandra, Neo4j, GraphDB, o TigerGraph

Fuente. Elaboración propia

2.2. Antecedentes de Estudio

A continuación, se presentan trabajos anteriores que sirvieron de ejemplo y motivación para desarrollar la presente tesis.

2.2.1. Antecedentes Nacionales

Berrios Gómez (2022) de la Universidad Privada de Tacna, propone un diseño de invernadero integrado con un sistema IoT para el monitoreo y control de temperatura y humedad que inciden directamente la producción de lechugas. El diseño se complementa con la creación de una aplicación móvil que facilitará la gestión remota del invernadero. El diseño tiene los siguientes objetivos: reducir los negativos de las heladas sobre las lechugas, crear un ambiente óptimo para la producción de las lechugas y reducir la supervisión constante in situ de los cultivos de lechuga.

Gomez Pacci (2019) de la Universidad Ricardo Palma, propone la implementación de invernaderos automatizados para incrementar la producción de rosas. Esta propuesta intenta solucionar las limitaciones geográficas y climáticas del país, que cuenta con escasas regiones en los que se puede cultivar rosa en comparación a otros países. El diseño del sistema IoT se basa en la arquitectura Fog Computing e implementa lógica difusa al sistema para tener control preciso sobre la humedad, temperatura, luminosidad y fertirriego.

Larico Infa (2019) de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa propone la automatización de la etapa de germinado y aclimatación de lechuga hidropónicas en un invernadero hidropónico no automatizado de la empresa Fagsol. La propuesta intenta reducir el mal control de las variables climáticas que son críticas para la germinación de lechugas y controlar el consumo de agua en regadío. La implementación del sistema IoT se basa en la arquitectura Cloud Computing y hace uso de la plataforma thinger.io que permite el análisis de datos y una interfaz de usuario para el monitoreo de las variables climáticas del invernadero.

2.2.2. Antecedentes Internacionales

Poblete Manzano (2023) de la Universidad de Chile propone automatizar los invernaderos de la comunidad José Painecura-hueñalihuen para mejorar la

producción agrícola, y a su vez fomentar el uso tecnologías en la agricultura en las comunidades rurales de Chile.

El diseño propuesto se basa en la arquitectura Cloud Computing y un sistema de control PID difuso para el control de riego, humedad y temperatura.

Plata Londoño (2023) de la Universidad de La Salle propone automatizar el invernadero de la facultad de agraria de la Universidad de La Salle, para lo cual emplea una arquitectura de 3 capas (percepción, red y aplicación). Para el control de las variables de temperatura, humedad y riego se emplea un sistema de control PID.

Naranjo Andrade y Zambrano Navarrete (2022) de la Universidad Agraria de Ecuador proponen automatizar un invernadero de la finca Pozo en Ecuador, los autores se enfocan en el riego por goteo del invernadero, para la implementación IoT emplea la arquitectura de tres capas y el control de las variables de temperatura, humedad y humedad relativa emplean el control tipo ON/OFF (todo o nada).

Hosny et al. (2024) realiza un análisis profundo de los avances y alcances actuales en la aplicación del IoT en los invernaderos, recalcan los beneficios del IoT, las tecnologías emergentes como sensores inteligentes, análisis de big data y machine learning permiten mejorar aún más el cultivo de plantas fuera de temporada, prevención de enfermedades, mejora en la producción y calidad de las cosechas. También mencionan los futuros desarrollos en la aplicación de la IoT incluyen la mayor integración de inteligencias artificiales (IA's) y análisis de big data mejorarán la toma de decisiones y la eficiencia operativa, el desarrollo de redes de comunicación más eficiente de largo alcance para invernadero grandes o de ubicación lejana, entre otros.

Farooq et al. (2022) analiza los retos actuales que atraviesa la agricultura tradicional y propone que la agricultura en invernaderos integrada con IoT y otras tecnologías actuales como el big data, cloud computing pueden ayudar a solucionarlos, por lo cual es muy importante la fomentación y educación a los sectores agrícolas sobre este tipo de agricultura y tecnología.

2.3. Bases Teóricas

2.3.1. MAD

MAD (*Median Absolute Deviation*), en español Desviación Absoluta Mediana. Es una medida estadística que calcula la dispersión o variabilidad de un conjunto de datos. Se aplica cuando los tamaños muestrales son moderados (entre 20 y 100).

Se calcula de la siguiente manera:

Dado un conjunto de datos $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$

1. Se obtiene la mediana del conjunto de datos

$$M = \text{mediana}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

2. Se obtiene las desviaciones absolutas respecto de la mediana

$$d_i = |x_i - M|$$

3. Se calcula el MAD

$$\text{MAD} = \text{mediana}(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n)$$

2.3.2. Arquitectura del IoT

Una arquitectura es una estructura base que sirve de guía para diseñar e implementar un sistema IoT. Las arquitecturas se pueden clasificar por su enfoque.

El enfoque por capas, buscan dividir el sistema IoT en módulos, llamados capas, cada capa tiene funciones y responsabilidades definidas que facilitan la implementación, mantenimiento y escalabilidad.

Arquitectura de 3 capas. Está arquitectura divide el sistema IoT en 3 capas: capa de percepción (sensores y actuadores), capa de red o transporte (Wi-fi, Bluetooth, Zigbee, redes de celular, etc.) y capa de aplicación (procesamiento de datos e interfaz de usuario). Es una arquitectura sencilla y fácil de

implementar, se recomienda su uso en sistemas. (MongoDB Resources, n.d.)

Arquitectura de 5 Capas. Esta arquitectura divide el sistema IoT en 5 capas: capa de percepción (sensores y actuadores), capa de red o transporte (transporta los datos usando Wi-fi, Bluetooth, Zigbee, etc.), capa de procesamiento o middleware (almacena, analiza y preprocesa los datos), capa de aplicación (coge los datos y obtiene información valiosa de ellos) y capa de negocio (interfaz de usuario, panel de control y herramientas de visualización de datos recopilados y procesados). (MongoDB Resources, n.d.)

Tabla 11

Arquitecturas basadas en el procesamiento de datos de un sistema IoT

Arquitectura	Descripción	Ventajas	Desventajas
Edge Computing	Procesan los datos localmente en dispositivos de borde.	❖ Permite un análisis en tiempo real para tomar decisiones inmediatas. ❖ No es necesaria una conexión a internet.	❖ Recurso de almacenamiento y procesamiento limitados. ❖ La gestión y escalabilidad es más complicada.
Fog Computing	Despliega recursos de computación en una capa intermedia entre dispositivos de borde y de nube.	❖ Permite un procesamiento más distribuido que el Edge Computing. ❖ La gestión y escalabilidad es mucho mejor que el Edge Computing.	❖ La latencia se incrementa con respecto al Edge Computing. ❖ Añade una capa más de complejidad a la arquitectura y requiere más recurso.
Cloud Computing	Los datos se envían a la nube donde se almacena y se analizan	❖ Permite análisis complejos y aprendizaje automático sobre grandes volúmenes de datos. ❖ Fácil escalabilidad y gestión.	❖ Latencia alta. ❖ Dependencia de una conexión de internet estable

Arquitectura	Descripción	Ventajas	Desventajas
Microservicios	El sistema IoT se descomponen en pequeños servicios independientes que pueden desplegarse y escalarse por separado	❖ Facilita la escalabilidad y el despliegue. ❖ Mejor adaptación a cambios.	❖ Añade complejidad a la arquitectura. ❖ Requiere más esfuerzo de diseño y desarrollo

Fuente. Elaboración propia

2.3.3. Aplicación del IoT en la Agricultura

La aplicación del IoT en la agricultura está revolucionando el sector, permitiendo una agricultura eficiente, precisa y sostenible. La recopilación de datos de dispositivos inteligentes y su posterior análisis en tiempo real mejora y optimiza los procesos agrícolas; en consecuencia, mejoran la productividad de los cultivos.

Las principales aplicaciones del IoT en la Agricultura se enfocan en los siguientes aspectos: (Gómez-Chabla et al., 2019)

- Agricultura de precisión: el IoT permite que los agricultores puedan monitorear las condiciones del suelo, del cultivo y del clima de extensas áreas con el uso de sensores, drones, software y hardware; en consecuencia, el agricultor puede tener el control y optimización del uso de sus recursos (agua, fertilizantes, etc.).
- Automatización de invernaderos: el IoT permite el control de factores climáticos (humedad, temperatura, CO₂ y luz) con la automatización de los sistemas de riego, sistema de ventilación e iluminación led.
- Prevención y control de plagas: el IoT puede detectar plagas alerta temprana de plagas basado en el análisis de datos históricos que permiten al agricultor actuar antes que los daños sean significativos.
- Gestión y almacenaje de semillas y cosechas: el IoT permite el manejo de inventarios y controlar las condiciones ambientales de los almacenes para

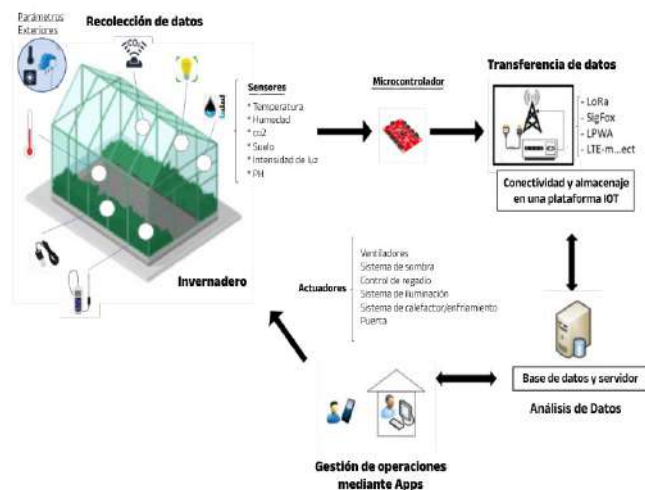
evitar las pérdidas de las cosecha o semillas.

- **Monitoreo Climático:** el IoT permite el monitoreo del clima, permitiendo predecir climas desfavorables y una planificación eficiente de actividades agrícolas.
- **Trazabilidad y seguridad alimentaria:** el IoT permite el seguimiento de cada etapa de producción agrícola, desde que se cultiva hasta que llega a manos del consumidor; de esta forma, se garantiza la calidad de la cosecha apta para el consumo humano y el transporte y proceso hasta su venta.

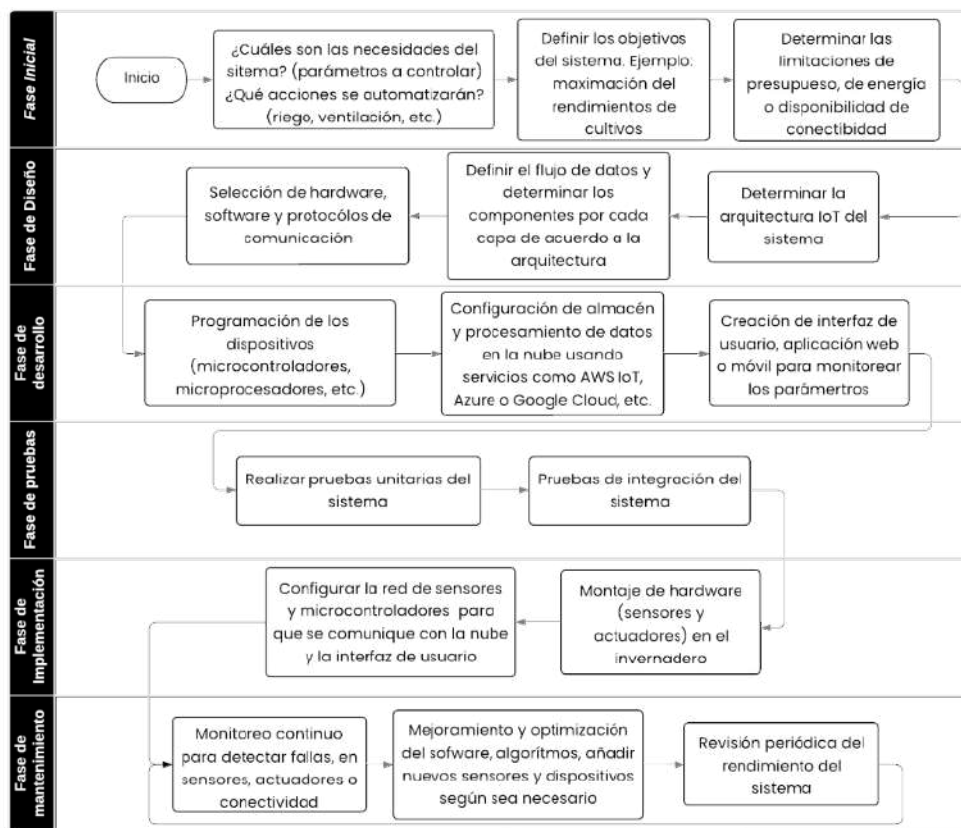
Automatización de Invernaderos. Automatizar un invernadero requiere de un proceso estructurado que incluya planificación, diseño y ejecución, con el objetivo de poder integrar IoT en un invernadero que pueda ser capaz de medir, controlar y automatizar sus sistemas. En la Figura 34 se muestra las fases para realizar la automatización de un invernadero. En la Figura 33 se muestra un esquema de un invernadero con un sistema IoT con arquitectura de cuatro capas o basada en cloud computing.

Figura 33

Arquitectura cloud computing en un invernadero



Nota. Adaptado de “Internet of Things Approaches for Monitoring and Control of Smart Greenhouses in Industry 4.0”, por Bersani et al., 2022, Energies, 15(10), p. 5 (<https://doi.org/10.3390/en15103834>). © 2022 por los autores, bajo licencia CC BY 4.0.

Figura 34**Fases para la automatización de un invernadero**

Nota. Adaptado de “Intelligent Agricultural Greenhouse Control System Based on Internet of Things and Machine Learning”, por Wang (2024), 2024, arXiv preprint arXiv:2402.09488. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.09488>

2.3.4. Sistemas de Control

Un sistema de control es un conjunto integrado de hardware y software diseñado con el objetivo de monitorear y regular el comportamiento de un sistema, de tal manera que las variables se mantengan dentro del rango deseado y asegurar un funcionamiento adecuado, eficiente y automatizado.

Sistema de Control PID. Un sistema de control PID (proporcional, integral y derivativo) es un tipo de controlador útil para regular variables (temperatura, humedad del suelo, humedad relativa, etc.) de un sistema, debido a la eficiencia de respuesta y tiempo de respuesta corto. Está compuesto por tres

tipos de componentes: Proporcional (P), Integral(I) y Derivativo (D) como se muestra en la Figura 35.

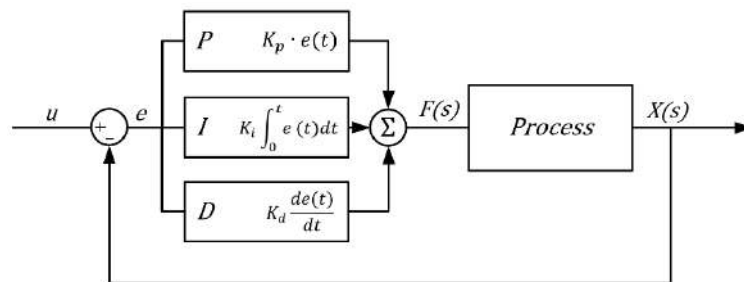
El componente Proporcional ajusta la salida en proporción al error actual, lo cual reduce el error.

El componente Integral (I) acumula el error a lo largo del tiempo y ajusta la salida para eliminar el error residual dejado por el componente proporcional.

El componente Derivativo (D) predice el error futuro basándose en su tasa de cambio de error, proporcionando una acción correctiva preventiva.

Figura 35

Sistema de control PID



Nota. Reproducido de “PID Control”, por Dewesoft (n.d.), n.d.

(<https://training-dewesoft-com.translate.goog/online/course/pid-control>).

Todos los derechos reservados por Dewesoft

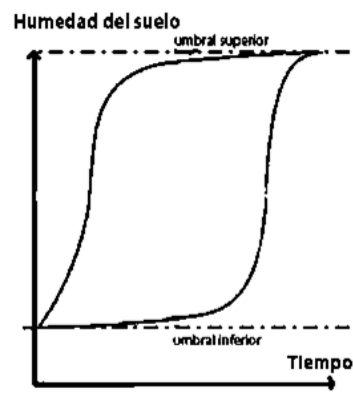
Control Difuso. El control difuso o lógica es una técnica utilizada para controlar un sistema de manera similar al razonamiento de una persona, no con respuestas binarias (on/off), sino respuestas que toman valores intermedios. Lo que permite tomar decisiones suaves y progresivas, lo cual es útil en sistema donde no debe haber cambios bruscos.

Por ejemplo, si se desea controlar el riego de cebolla china sin que la humedad del suelo no supere el 80%, la lógica difusa permite modular el paso de agua al sistema de riego. En lugar de activarlo o desactivarlo completamente, el sistema puede ir reduciendo progresivamente el paso de agua a medida que la humedad alcanza al umbral máximo, evitando así un exceso de riego y promoviendo un uso de agua.

Control por Histéresis. El control por histéresis es un principio que evita fluctuaciones innecesarias ante el cambio de una variable, ya que considera un rango de tolerancia (un umbral superior y uno inferior) como se muestra en la Figura 36, es decir si la variable toma valores que están dentro del rango el sistema no cambiará.

Figura 36

Gráfica simple de ciclo de histéresis de tiempo vs. humedad



Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

El presente capítulo tiene como objetivo presentar la formulación de las hipótesis y la definición de las variables empleadas en la investigación.

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

Un invernadero inteligente permite la producción continua de cebolla china en la localidad de Taquia y optimiza el uso de agua en los riegos.

3.1.2. Hipótesis Específicas

1. Los factores ambientales como la temperatura, humedad, iluminación y riego automatizado influyen en la producción de cebolla china en un invernadero en el anexo de Taquia.
2. Es posible diseñar un sistema de invernadero inteligente de bajo costo para controlar de forma eficiente los factores críticos para el cultivo de cebolla china.
3. El prototipo de invernadero inteligente permite mantener condiciones ambientales estables, lo que permitirá el cultivo continuo de cebolla china durante todo el año en la localidad de Taquia.
4. La implementación de un invernadero inteligente de bajo costo permite un uso eficiente del agua y mejora la calidad de producción de cebolla china, resultando económicamente viable en la localidad de Taquia.

3.2. Variables

3.2.1. Variables Independientes

- a) Temperatura: Esta variable es capturada mediante un módulo sensor DHT22, el cual envía los datos al sistema para que, en función a esta información, pueda ejecutar acciones previamente programadas. Si la temperatura excede el umbral establecido el sistema activará la ventilación con el fin de disminuir la temperatura para mantenerla dentro del rango adecuado para el cultivo de cebolla china.
- b) Humedad del suelo: Esta variable es medida mediante un sensor FC-28, el cual envía los datos al sistema para que, en función a la información, pueda ejecutar acciones previamente programadas. Activando o desactivando el riego para mantener la humedad del suelo dentro del rango adecuado para el cultivo de cebolla china.
- c) Luz: Esta variable es medida mediante un módulo sensor BH-1750, envía los datos al sistema para que, en función a esta información, pueda ejecutar acciones previamente programadas. Active o desactive la iluminación artificial según sea necesario, con el fin de proporcionar al cultivo de cebolla china las condiciones de luz adecuadas que favorezcan su desarrollo.

3.2.2. Variables Dependientes

- a) Consumo de agua (L): Esta variable representa la cantidad total de agua utilizada en el riego durante un ciclo de cultivo y permite cuantificar el uso de este recurso facilitando la comparación entre prácticas de manejo y su incidencia en el desempeño productivo del cultivo.
- b) Rendimiento (kg/m²): Esta variable representa la cantidad total de kilogramos de cebolla china obtenidos por cada metro cuadrado cultivado durante un ciclo agrícola. El rendimiento se utiliza como un indicador clave de productividad.
- c) Ganancia (ROI, PRI, VAN): Esta variable son los indicadores económicos

que determinan si un proyecto es viable económicamente.

3.2.3. Variables Externas

- a) Flujo de agua proveniente del manantial: Esta variable influye directamente en la capacidad de mantener la humedad del suelo adecuada. Su caudal tiende a aumentar durante la estación lluviosa y disminuir en la estación seca, afectando la disponibilidad de agua para los sistemas de riego.
- b) El precio de la cebolla china: Esta variable depende de factores externos al sistema, como la oferta de producción de pueblos aledaños, entre otros. Su variación impacta en la rentabilidad del cultivo.

3.3. Operacionalización de Variables

En la Tabla 12 se presenta como las variables serán observadas y medidas dentro del presente estudio.

Tabla 12

Operacionalización de Variables

Variable	Dimensión	Indicador	Instrumento	Unidad	Escala	Frecuencia
Temperatura	Temperatura del aire	Grados de temperatura registrados	Sensor DHT22	°C	Intervalo	Cada 1s
Humedad del suelo	Humedad volumétrica del suelo	Porcentaje de humedad	Sensor FC-28	%	Razón	Cada 1s
Luz	Intensidad lumínica	Nivel de luz incidente	Sensor BH1750	lux	Razón	Cada 1s

Nota. Elaboración propia

3.4. Indicadores de Evaluación

Para evaluar el desempeño del invernadero, se establecieron los siguientes indicadores cuantitativos:

- Volumen de agua regada (L): Se mide usando el sensor de flujo YF-201. No se controlada directamente por el sistema IoT del invernadero. Sin embargo, es un indicador que permite analizar la eficiencia y ahorro de agua de un riego controlado frente al riego tradicional. El microcontrolador activa la medición cada vez que el sistema de riego se ha encendido.
- Tiempo de ventilación: Tiempo en el cual el ventilador estuvo encendido. El microcontrolador automáticamente registra el tiempo de inicio y fin de cada sesión de ventilación.
- Tiempo de iluminación: Tiempo en el cual la iluminación estuvo encendido. El microcontrolador automáticamente registra el tiempo de inicio y fin de cada sesión de ventilación.

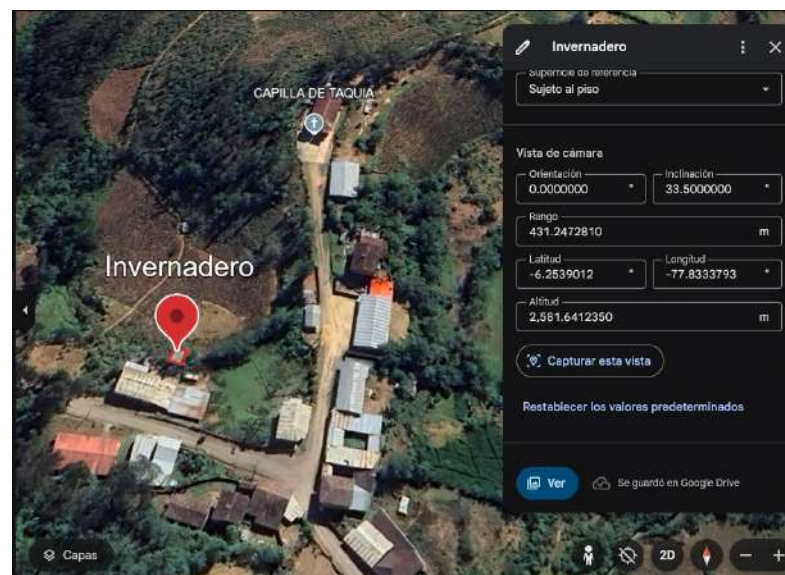
CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de Estudio

La presente investigación se llevó a cabo en el anexo de Taquia, ubicado en el distrito de Chachapoyas, provincia del mismo nombre, departamento de Amazonas, Perú. Según se muestra en la Figura 37, esta área de estudio se ubica a una altitud aproximada de 2,581 metros sobre el nivel del mar, latitud: 6.2539° Sur, Longitud: 77.8333° Oeste. Es una zona de geografía accidentada y clima templado subhúmedo, con alta humedad relativa y lluvias estacionales, como se detalla en la Sección anterior.

Figura 37

Ubicación Geográfica del Área de Estudio



Nota. Imagen adaptada de Google Earth (2025), 2025

(<https://earth.google.com/earth/d/1DqqQCnQzsFqEjiKvq4cCBNVU4oEtDKSe?usp=sharing>). Todos los derechos reservados por Google

4.2. Diseño de Investigación

4.2.1. Tipo de Investigación

La investigación es aplicada y experimental, puesto que intenta resolver la problemática de la dependencia climática para la producción de cebolla china bajo el sistema de agricultura tradicional en la localidad de Taquia mediante la manipulación y medición de variables específicas (humedad, temperatura y luminosidad).

4.2.2. Nivel de Investigación

Esta investigación es explicativa, puesto que intenta demostrar que un invernadero inteligente permite el cultivo continuo de cebolla china sin depender del clima y optimiza el uso de agua en la localidad de Taquia.

4.2.3. Enfoque Metodológico

En cuanto al enfoque metodológico, esta investigación se clasifica como una investigación mixta: cuantitativa, puesto que mide, analiza y controla las variables climáticas de un invernadero y hace proyecciones de indicadores financieros; cualitativa, dado que evalúa la calidad de cebolla china producido en un ambiente controlado.

4.3. Población y Muestra

La población del estudio está constituida por los cultivos de cebolla china (*Allium fistulosum*) sembradas en condiciones bajo invernadero en la localidad de Taquia, distrito de Chachapoyas, departamento de Amazonas.

Para efectos de esta investigación, se trabajó con una muestra controlada de

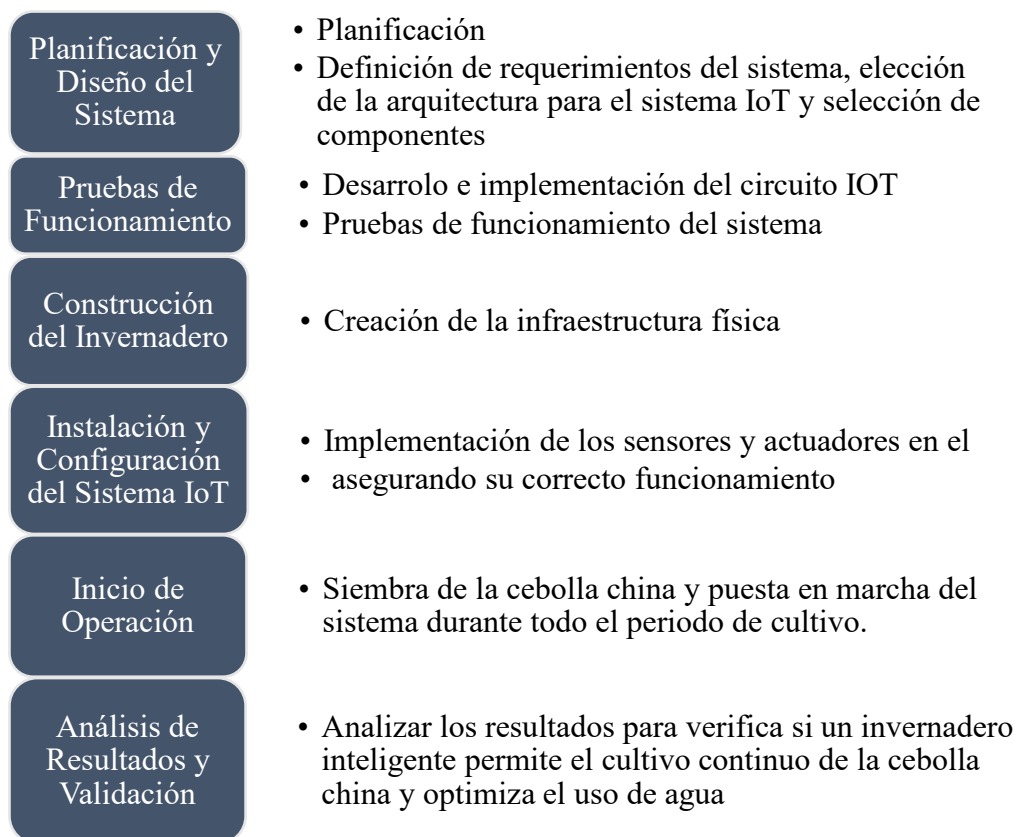
cultivo, sembrada en condiciones controladas dentro del invernadero implementado, abarcando una superficie de aproximadamente de 25 m². Esta muestra fue seleccionada intencionalmente mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, ya que responde a criterios técnicos de espacio, disponibilidad de recursos y tiempo de evaluación.

4.4. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

La implementación del proyecto se divide en 6 etapas, tal como se muestra en la Figura 33, las cuales permiten estructurar de manera ordenada el proceso de desarrollo, desde la planificación

Figura 38

Etapas de Implementación



Nota. Elaboración Propia

Planificación. Para poder trabajar en orden y llevar un seguimiento eficaz del progreso del proyecto se implementó un diagrama de Gantt que permite organizar y optimizar los tiempos de ejecución. Se estimó una duración de 70 días (2 meses y 10 días), este tiempo la totalidad del proyecto, en el Anexo A se detallan las actividades desarrolladas durante el periodo.

Definición de requerimientos del sistema, elección de la arquitectura para el sistema IoT y selección de componentes. Los requerimientos se realizaron teniendo en cuenta Diversos estudios (Chachapoyas-SENAMHI, 2024; Huaraca, 2015) muestran que la productividad de cebolla china se maximiza cuando: temperatura 14–24 °C, humedad del suelo 50–75 %, luz ≥ 12 h día (para más detalles ver Anexo B)).

Se determinan los requerimientos del sistema considerando los factores más importantes para la producción de cebolla, considerando el factor económico y la disponibilidad de recursos para el proyecto. Por lo cual, se monitorearon exclusivamente las variables de humedad del suelo, temperatura y luz mediante los sensores DHT22, FC-28 y BH1750. (Para más detalles véase el Anexo C).

Para el proyecto se escogió la arquitectura de 3 capas teniendo en cuenta la sencillez y facilidad de implementación (Ver Anexo D), la elección de componentes para el sistema se tuvo en cuenta el costo y la disponibilidad de los componentes en el mercado local (Ver Anexo E), el tipo de control es considerado de acuerdo a la facilidad de implementación considerando la dimensión del proyecto (Ver Anexo F), la tecnología y protocolo fue elegido de acuerdo a la disponibilidad de la tecnología en la localidad (Ver Anexo G).

Desarrollo e implementación del Sistema IoT. Se desarrolló el código de control de temperatura, humedad del suelo, luz y medición de agua para riego para el microcontrolador Esp32-WROOM-32 usando Visual Studio Code (VS code) y PlatformIO así como el desarrollo del backend, la configuración de la base de datos y frontend del dashboard que se desarrolló usando Typescript y React en VS Code(Ver Anexo H), posteriormente se hizo las simulaciones usando Wokwi del código de control para el microcontrolador (Ver Anexo I), se

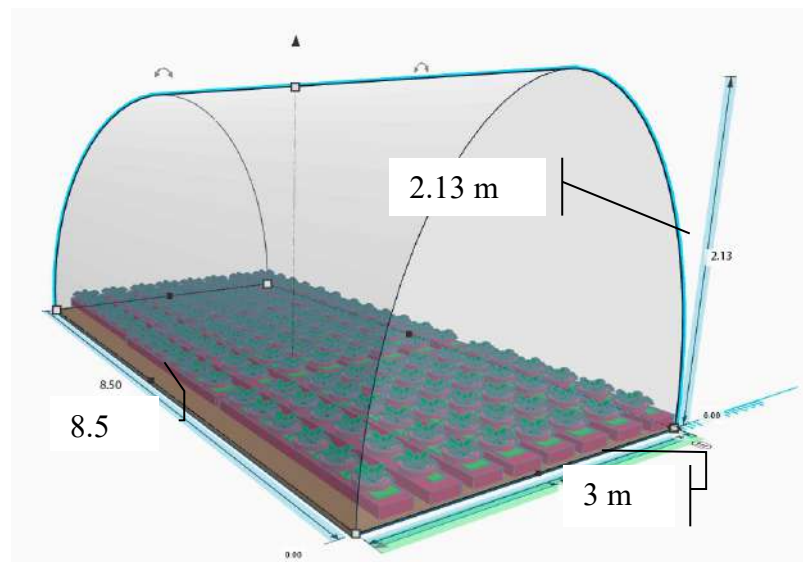
hizo el despliegue del frontend y el backend en Vercel y Rails respectivamente (Ver Anexo J). Y, por último, se implementó el circuito del sistema IoT y se hicieron las pruebas (Ver Anexo K)

Implementación del Prototipo de Invernadero Inteligente. Se eligió construir un invernadero tipo túnel y se definió las características que eran necesarias (Ver Anexo L) se creó un diseño base del invernadero como se aprecia en la Figura 39, luego se pasó a construir el invernadero (como se muestra en la Figura 40), la instalación del sistema IoT y las pruebas finales (Ver Anexo M)

Inicio de operaciones. Se preparó cuidadosamente la tierra, una vez plantado el cultivo y culminada la instalación de los componentes tecnológicos, el invernadero comenzó a operar, permitiendo el monitoreo y control automático de las principales variables ambientales y productivas para cada ciclo agrícola. (Ver Anexo M)

Figura 39

Maqueta de invernadero a construir



Nota. Elaboración propia

Figura 40*Construcción terminada del invernadero**Nota. Elaboración propia***4.4.1. Procedimiento Experimental**

Durante los 45 días que duró la fase producción (21/10/2024 al 14/12/2024) el ESP32-WROOM-32 ejecutó cada segundo, siguiendo la secuencia:

1. Captura sincrónica de la temperatura (T), humedad del suelo (θ) y luz (L)
2. Evaluación de umbrales (ciclo de histéresis):
 - $\theta < 50\% \rightarrow$ abre la válvula selenoide; cierra al llegar a $\theta \leq 75\%$
 - $T > 25^{\circ}\text{C} \rightarrow$ activa ventilador; apaga con $T \leq 15^{\circ}\text{C}$
 - $L < 400 \text{ lx}$ (6:00 -20:00 h) $\rightarrow$ enciende cinta LED
3. Envío de datos mediante HTTP POST al backend Node/ MongoDB

4.4.2. Técnicas e Instrumentos de Medición y Control

En la Tabla 13 se presenta los instrumentos de medición de las variables (temperatura, humedad del suelo, iluminación. Además, el instrumento de medición del agua gastada en el riego.

Tabla 13*Instrumentos de medición y control de las variables*

Instrumento	Variable	Rango / resolución	Precisión	Ubicación
DHT22	Temperatura del aire, Humedad relativa	−40 a 80 °C / 0,1 °C 0–100 % HR / 0,1 %	±0,5 °C; ±2 % HR	A 1,5 m sobre sustrato (centro)
Sensor FC-28 (capacitivo)	Humedad volumétrica del suelo (θ)	0–100 % V/V (salida analógica 0–3,3 V)	±3 % V/V tras calibración	Enterrado a 6 cm en los cultivos de cebolla china
BH1750	Iluminancia	1 – 65 535 lx / 1 lx	±3 % (15 – 20 000 lx)	Suspendido a 60cm
YF-S201	Caudal instantáneo del riego	1–30 L min ^{−1}	±5 % (5 – 20 L min ^{−1})	Línea de entrada a la válvula NC
Válvula solenoide NC ½"	Riego on/off	0–8 bar	—	Junto al YF-S201
Ventilador	Ventilación	90 – 110 m ³ /min (≈ 3 200 – 3 900 CFM)	—	Panel lateral, sobre la puerta
Cinta LED Grow 24 W/m	Iluminación suplementaria	Pico 460 nm / 640 nm	—	Cumbrera interior

Nota: Elaboración propia con datos extraídos de Aosong (Guangzhou) Electronics Co. (n.d.), Texas Instruments (1999), Handson Technology (n.d.), Foshan Shunde Zhongjiang Energy Saving Electronics Co (n.d.), Firstpro (n.d.), Naylamp Mechatronics (n.d.)

4.4.3. Calibración de Instrumentos y Respaldo de Datos

En la Tabla 14 se muestran los parámetros de calibración. El microcontrolador

(Esp32) descarta valores fuera de rango físico — tales como: temperaturas menores a 0°C o mayores a 60°C— y marca la lectura como “error”. Cuando este estado aparece en el dashboard, se procede a recalibrar el sensor o a reemplazar el componente según corresponda.

Adicionalmente, cada segundo se genera un archivo JSON con timestamp en UTC-5. Este dato es enviado al backend, quien lo recibe, lo almacena en base de datos y, mediante WebSocket, transmite en tiempo real al dashboard (frontend).

Tabla 14

Parámetros de calibración

Variable	Técnica Principal	Error admisible	Validación en campo
Temperatura (T)	Lectura digital simultanea con sensor DHT22 vía protocolo One-Wire	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	No requiere calibración, pero se comparó con un termohigrómetro Htc-2 patrón $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
Humedad del suelo (θ)	Conversión analógica del sensor capacitivo FC-28 (ADC-1 GPIO 34)	$\pm 3\%$	Calibración antes de cada ciclo de cultivo con suelo seco y saturado
Iluminancia (L)	Lectura I2C con sensor BH1750	$\pm 3\%$	No requiere calibración, pero se comparó con un luxómetro Temmars TM-209 patrón
Caudal de riego	Conteo de pulsos del caudalímetro YF-S201) mientras la electroválvula está activa	$\pm 5\%$	No requirió calibración, al comparar se calculó error residual $\pm 4\%$

Nota. Los sensores se verificaron al inicio y cada 7 días. Elaboración propia

4.5. Análisis Estadístico

4.5.1. Preparación de Datos

Se consolidarán 52 registros; las variables numéricas se depurarán $MAD \pm 3.5$, que se eligió por que la muestra está entre 20 y 100. El invernadero piloto (25 m²) se proyectará a 250 m² multiplicando los kg y litros por un factor 10, reconociendo su carácter hipotético.

4.5.2. Estadística Descriptiva

Se obtendrán media de kg sembrados, kg cosechados, precio medio y litro de agua consumidos en riego.

4.5.3. Análisis Financiero

Se calcularán ROI, PRI y VAN bajo cuatro escenarios de precio (pesimista, realista bajo, realista alto y optimista).

Dado que el sistema IoT se evaluó en un solo ciclo, no fue posible aplicar pruebas de normalidad (como shapiro-Wilk) ni t-Student. En su lugar se presenta la diferencia porcentual respecto al promedio convencional y se discute como evidencia preliminar.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

Este capítulo resume los principales resultados del ciclo de cultivo de cebolla china cultivado en un invernadero implementado con un sistema IoT y los compara con la producción convencional obtenida de la encuesta (n=52) aplicada a los agricultores de la localidad de Taquia como se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15

Comparación descriptiva convencional vs IoT de cebolla china

Indicador	Convencional (n = 52)	IoT (n = 1, proyectado x10)	%Δ
Rendimiento (kg/m ²)	0.77 ± 0.12	1.02	33
Consumo de agua (L/kg)	86 ± 15	22	-74
Costo/ciclo (S/)	140.9 ± 18.5	126	-10
Ganancia/ciclo (S/)	131.6 ± 28.3	179	36

Nota. IoT es una proyección lineal para una parcela de 250m²; no se aplican prueba inferenciales. Elaboración propia

5.1. Resultados de la Encuesta Aplicada

En la localidad de Taquia habitan 55 familias dedicadas en su mayoría a actividades agrícolas. Para este estudio se realizó una encuesta dirigida a los representantes de familia, logrando aplicar el instrumento en 52 hogares, lo que garantiza una cobertura representativa y validez externa adecuada. La encuesta empleada para recopilar información socioeconómica y productiva se presenta en el Anexo U

Tabla 16*Estadísticos descriptivos de la encuesta (n=52)*

Variable	n	μ	σ	Me	Mín	Máy	CV %
Área de parcela (m ²)	51	253.9	44.6	250	150	350	17.5
Bulbo necesario (kg)	51	16	3.2	15	10	25	19.8
Índice de multiplicación (kg kg ⁻¹)	51	5.35	0.91	6,0	4.0	7.0	17.0
Costo promedio por parcela (S/)	51	140.9	18.5	140	90	180	13.2
Ganancia promedio por parcela (S/)	51	131.6	28.3	130	80	200	21.5
Precio promedio por kg (S/)	51	6.57	0.90	7.0	5.0	8	13.7

Nota. n (encuestados), μ (media), σ (desviación estándar), Me (mediana), CV < 10% es muy homogéneo, 10% < CV < 30% es de variación moderada. CV > 30% representa gran dispersión. Elaboración propia

5.1.1. Comprobación de la Encuesta

Para las respuestas de la encuesta de costo de producción, ganancia por parcela promedio y precio promedio de un kilogramo de cebolla china se aplicó el filtro MAD ± 3.5 no se identificaron valores atípicos (outliers) como se observa en la Tabla 17; En conclusión, los tres indicadores presentan una dispersión aceptable, esto coincide a los resultados obtenidos en la Tabla 16 en la cual se muestra que el coeficiente de variación (CV) es menor al 30%, lo cual indica una variación moderada. Por lo tanto, los 52 registros parecen coherentes y pueden analizarse sin exclusiones.

Tabla 17*Límites y MAD*

Variable (columna numérica)	Mediana (S/)	MAD (S/)	Límite inferior (S/.)	Límite superior (S/.)	Outliers
Costo promedio (S/ parcela)	140	10	88.1	191.9	0
Ganancia promedio (S/)	130	20	26.2	233.8	0

Variable (columna numérica)	Mediana (S/)	MAD (S/)	Límite inferior (S/.)	Límite superior (S/.)	Outliers
parcela) Precio promedio (S/ kg)	7.0	1.0	1.81	12.19	0

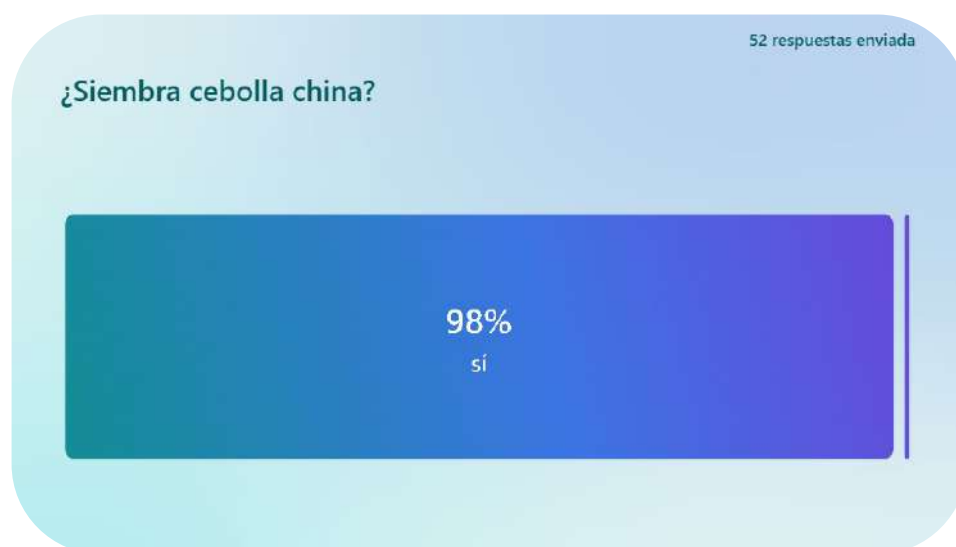
Nota. MAD calculado con la regla $MAD \pm 3.5$. Elaboración propia

5.1.2. Siembra de Cebolla China en la Localidad de Taquia

Según las respuestas obtenidas de los agricultores de la localidad de Taquia el 98% afirmaron que la cebolla china es parte de sus cultivos.

Figura 41

Estadística 1 de encuesta



Nota: Elaboración propia generado con Microsoft Forms (2025)

5.1.3. Elección de la Cebolla China

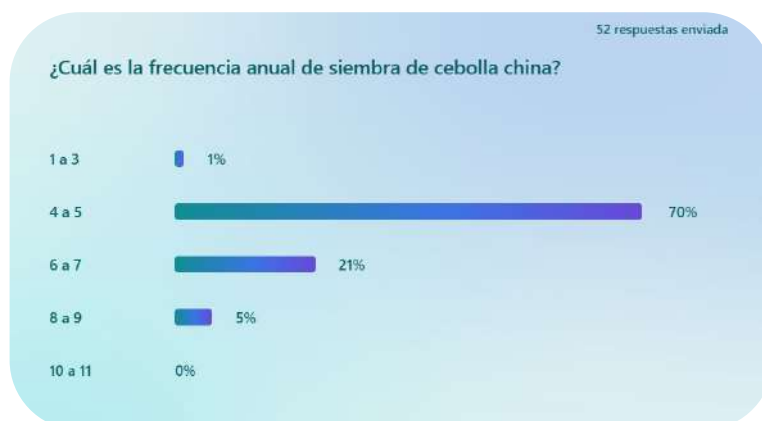
El 42% de los agricultores encuestados afirma que escogen la cebolla china porque su ciclo de desarrollo (45 días aproximadamente) hasta la cosecha es acelerado, lo que les permite obtener el retorno de inversión en un plazo corto (ver Figura 42).

Figura 42*Estadísticas de la encuesta, pregunta 2**Nota:* Elaboración propia generado con Microsoft Forms (2025)**5.1.4. Frecuencia de Siembras Anuales**

El 60% de los encuestados indicó que realiza de 3 a 5 ciclos de cultivo de cebolla china durante un año, el 28% siembra de 6 a 7 veces al año y el 12% indica que siembra más de 8 veces al año (ver Figura 43) Esto evidencia que el cultivo de cebolla china en la localidad de Taquia se realiza constantemente y que hay una porción minoritaria de agricultores que tiene las facilidades para el cultivar cebolla china, lo que les permite cultivar más veces el año.

Figura 43

Distribución porcentual de la frecuencia anual de siembra de cebolla china en la localidad de Taquia

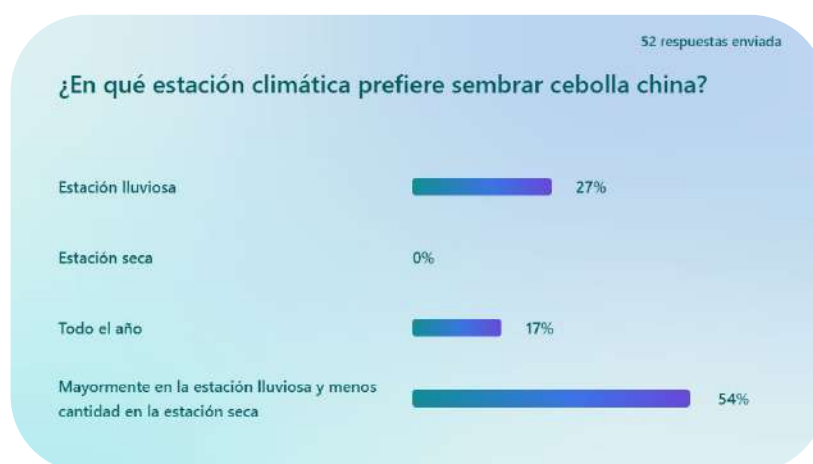
*Nota:* Elaboración propia generado con Microsoft Forms (2025)

5.1.5. Estación Climática de Siembra de la Cebolla China

Se observó que el 54% de agricultores reduce sus áreas de cultivo durante la estación seca (ver Figura 44), concentrando mayores áreas de cultivo en la estación lluviosa, el 27% no realiza cultivo de cebolla china en la estación seca, mientras que el 17% indicó que cultiva durante todo el año.

Figura 44

Distribución porcentual de la estación preferente para el cultivo de cebolla china en la localidad de Taquia



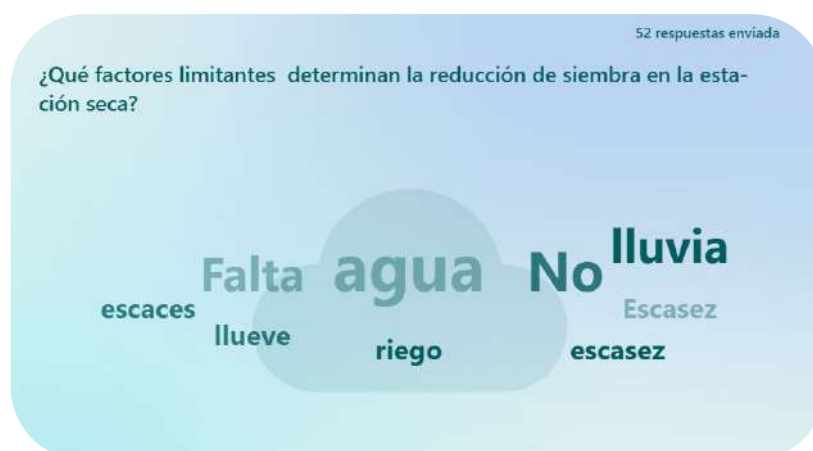
Nota: Elaboración propia generado con Microsoft Forms (2025)

5.1.6. Limitaciones para la Siembra de Cebolla en la Estación Seca

Según las respuestas obtenidas en la encuesta aplicada a los agricultores de la localidad de Taquia, los factores limitantes más recurrentes para el cultivo de cebolla china son la falta de agua y la ausencia de lluvias, situación que afecta directamente la siembra, el desarrollo y la productividad del cultivo en la zona. Estos problemas hídricos se reflejan claramente en la Figura 45 del estudio, donde se observa que la mayoría de los productores señala estos factores como los principales obstáculos para una campaña exitosa y sostenible en la localidad. La escasez de agua, agravada por periodos de sequía prolongada, también genera preocupación por la calidad, el tamaño y el rendimiento del cultivo en comparación con temporadas anteriores.

Figura 45

Nube de palabras de Limitaciones de siembra de cebolla china en la localidad de Taquia durante la estación seca



Nota: Elaboración propia generado con Microsoft Forms (2025)

5.1.7. Métodos de Riego

El 100% de los agricultores de Taquia utilizan el método de riego por aspersión en sus parcelas de cebolla china. Este tipo de sistema, aunque de bajo costo y fácil instalación, suele generar elevados niveles de desperdicio de agua y dificulta el control preciso de la humedad en el sustrato, lo que puede afectar la eficiencia hídrica y el desarrollo homogéneo del cultivo.

5.1.8. Área Promedio de una Parcela Dedicada al Cultivo de Cebolla China

Según las respuestas obtenidas en la encuesta aplicada a los agricultores de la localidad de Taquia, el 80% de las parcelas destinadas al cultivo de cebolla china tienen un tamaño promedio que oscila entre 200 y 300 m². Un 11% de los productores indicó que establecen sus cultivos en parcelas entre 300 y 400 m², mientras que el 7% reportó que sus áreas de producción van de 100 a 200 m², como se refleja en la Figura 46 del estudio. Estos datos permiten identificar el predominio de pequeñas y medianas unidades productivas, facilitando el análisis comparativo de prácticas agrícolas y resultados de producción en el contexto local.

Figura 46

Gráfica de barras del tamaño de parcelas dedicadas al cultivo de cebolla china en la localidad de Taquia



Nota: Elaboración propia generado con Microsoft Forms (2025)

5.1.9. Cantidad de Bulbos Necesarios para Cultivar una Parcela

Según las respuestas obtenidas, el 68% de los agricultores de la localidad de Taquia requiere entre 15 a 20Kg de bulbos de cebolla china para cultivar una parcela. Un 19% indicó necesitar entre 20 a 25Kg, mientras que el 7% señaló que utiliza entre 10 a 15Kg (ver Figura 47).

Figura 47

Gráfica de barras de la cantidad de bulbos para el cultivo de cebolla china en la localidad de Taquia



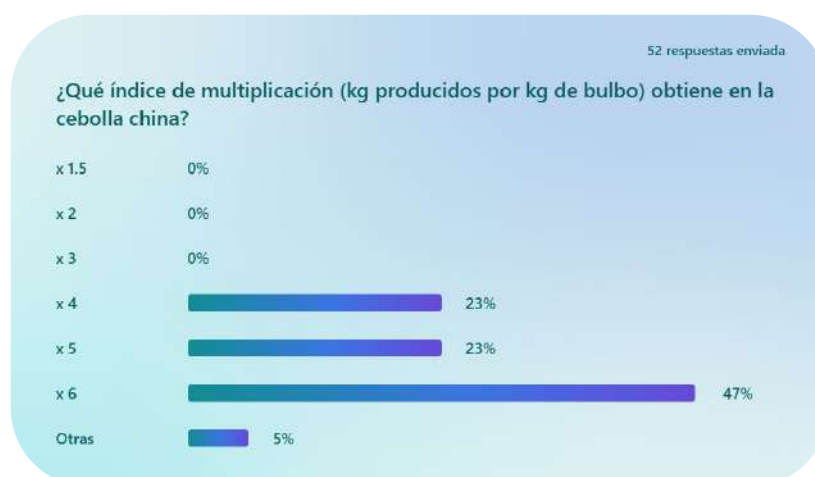
Nota: Elaboración propia generado con Microsoft Forms (2025)

5.1.10. ***Índice de Rendimiento de Bulbos Sembrados y Cebolla China Cosechado***

Según las respuestas obtenidas, el 47% de los agricultores de la localidad de Taquia consideran que obtienen una cosecha equivalente a seis veces la cantidad de kilogramos de bulbos de cebolla china sembrado. El 23% afirma que su rendimiento es cinco veces lo sembrado, y el otro 23% indica que cosecha 4 veces lo sembrado (Ver figura Figura 48)

Figura 48

Gráfica de barras del índice de cosecha de cebolla china en la localidad de Taquia



Nota: Elaboración propia generado con Microsoft Forms (2025)

5.1.11. ***Costo Promedio para el Cultivo de Cebolla China de una Parcela***

De acuerdo con los datos obtenidos de la encuesta aplicada a los pobladores de la localidad Taquia, el costo promedio para sembrar cebolla china en una parcela es de 144.88 nuevos soles.

5.1.12. ***Ganancia Promedio al Cosechar una Parcela de Cebolla China***

De acuerdo con los datos recopilados en la encuesta a los pobladores de la localidad de Taquia, la ganancia neta promedio al cosechar una parcela de cebolla china es de 270 nuevos soles, aunque en escenarios óptimos el valor puede llegar hasta 600 soles por parcela. Además, es importante destacar que los agricultores practican la siembra escalonada del cultivo, permitiendo disponer de entre 5 y 6 parcelas en promedio por agricultor a lo largo del año, lo que facilita la generación continua de ingresos y la diversificación de los riesgos productivos ante variaciones climáticas y de mercado. Esta estrategia agronómica permite optimizar el uso del terreno, mejorar la disponibilidad de agua durante diferentes ciclos y asegurar una oferta frecuente del producto.

5.1.13. Precio por Kilogramo de Cebolla China

El precio promedio reportado para 1 kg de cebolla china en la localidad de Taquia es de 7 nuevos soles, según respuesta del 75% de los agricultores encuestados. Este valor indica que la ganancia generada por el cultivo dependerá principalmente del rendimiento de cada parcela (kg/m^2) y de condiciones específicas del mercado local. Así, cuanto mayor sea el rendimiento productivo por metro cuadrado, mayor será la rentabilidad obtenida por los productores ante el precio reconocido actualmente en la zona

5.1.14. Principales Problemas para el Cultivo de Cebolla China

Según las respuestas de la encuesta realizada en la localidad de Taquia, los agricultores identifican diversas limitantes para el cultivo de cebolla china. El 27% señala como principal problema la distribución desigual del agua de riego durante la estación seca, mientras que el 26% destaca la escasez de lluvias en los últimos años como factor limitante. Un 23% indica el exceso de humedad en la temporada lluviosa, especialmente en terrenos planos y mal drenados, lo cual puede afectar el crecimiento y sanidad del cultivo. El 14% atribuye las dificultades a la proliferación de enfermedades vinculadas con la contaminación ambiental, y un 8% menciona los fenómenos naturales adversos como granizos, lluvias intensas y ventarrones. Estos resultados,

ilustrados en la Figura 49, reflejan la diversidad de retos agronómicos y ambientales enfrentados por los productores en el manejo de cebolla china

Figura 49

Gráfica de barras de las dificultades de los agricultores de la localidad de taquia para el cultivo de cebolla china en la localidad de Taquia



Nota: Elaboración propia generado con Microsoft Forms (2025)

5.1.15. Ganancia por Metro Cuadrado

Para el calcular la ganancia por m², consideraremos el tamaño promedio de una parcela de 250m², y la ganancia promedio de 130 nuevos soles como la ganancia neta. Usando la ecuación (1) obtenemos que por cada m² de cebolla china los agricultores de la localidad de Taquia ganan 52 céntimos.

$$Ganancia \times m^2 = \frac{Ganancia \ Neta}{Area \ promedio \ de \ una \ parcela} \quad (1)$$

$$Ganancia \times m^2 = \frac{270}{250} = 1.2$$

5.1.16. Cálculo Aproximado de Riego en la Estación seca en un ciclo de cultivo de cebolla china

De acuerdo con la encuesta realizada, todos los agricultores practican el riego

por aspersión, usando mariposas de la marca Trupper (alcance aproximado de 345m²). para realizar el cálculo se considera las siguientes condiciones:

- Presión de trabajo de la mariposa es de 40 a 50psi
- Tubería de agua de ½" marca Nicoll
- Riego con válvula abierta al 75% aproximadamente
- El riego son en promedio 4 horas 3 veces por semana, durante 45 días (6.5 semanas)

En base a las tablas hidráulicas y datos técnicos proporcionados por fabricantes de la marca Nicoll, se determinó que, bajo las condiciones de trabajo de 40 psi y apertura de válvula al 75%, el flujo de agua alcanza los 16.5 L/m. Aplicando la ecuación (2), este nivel de flujo representa un consumo de 3960 L de agua por sesión de riego de 4 horas (240 minutos). Considerando que el cultivo de cebolla china tiene una duración de 6.5 semanas, y utilizando la ecuación (3), se estima 19.5 riegos por cada ciclo de cultivo. Finalmente aplicando la ecuación (4), se obtuvo que el consumo de agua en riego por parcela durante un ciclo de cultivo de cebolla china asciende a 77, 229 litros.

$$\text{Volumen}_{x \text{ riego}} = \text{caudal} \times \text{tiempo} \quad (2)$$

$$\text{Volumen}_{x \text{ riego}} = 16.5 \times 240 = 3960L$$

$$\text{Cantidad}_{\text{riego}} = \text{frecuencia}_{\text{semanal}} \times \text{tiempo}_{\text{semanas}} \quad (3)$$

$$\text{Cantidad}_{\text{riego}} = 3 \times 6.5 = 19.5 \text{ riego}$$

$$\text{Volumen}_{x \text{ campaña}} = \text{Volumen}_{x \text{ riego}} \times \text{Cantidad}_{\text{riego}} \quad (4)$$

$$\text{Volumen}_{x \text{ campaña}} = 3960 \times 19.5 = 77220 L$$

5.2. Resultados del Cultivo de Cebolla China en Invernadero

Tras el finalizar el ciclo de cultivo de la cebolla china, se procedió a desconectar el sistema IoT. La Figura 50 muestra el dashboard con los últimos

registros de los sensores, incluyendo los datos acumulados durante todo el ciclo de cultivo: un consumo total de agua de 2,048 litros un tiempo acumulado de funcionamiento del ventilador de 132.4 horas, y 32.4 horas de activación del sistema de iluminación. Estos se usaron para calcular parte de los gastos de operación durante un ciclo de cultivo de cebolla china.

Figura 50

Dashboard antes de apagar el sistema IoT para la cosecha de cebolla china



Nota. Elaboración propia

En la Figura 51 se observa el cultivo de cebolla china desarrollado en invernadero, luego de finalizar un ciclo agrícola de 45 días, acorde con el periodo vegetativo reportado en estudios agronómicos para esta especie bajo

condiciones controladas. Una vez culminado el desarrollo fisiológico y alcanzado el tamaño óptimo, se procedió a desconectar el sistema IoT instalado para el monitoreo y automatización de variables ambientales, permitiendo así el inicio de la cosecha manual de las plantas. El manejo integrado y el ambiente protegido brindado por el invernadero contribuyeron a una buena producción.

Figura 51

Cebolla China de 45 días



Nota. Elaboración propia

5.2.1. Comparación de la Altura de las plantas en la Cosecha de Cebolla China

El cultivo de cebolla china en invernadero fue diseñado con la expectativa de obtener plantas con altura y peso iguales o superiores a los logrados en condiciones de campo abierto en la localidad de Taquia, donde comúnmente las plantas alcanzan entre 30 y 45 cm. Tal como se muestra en la Figura 17, las plantas cosechadas en el sistema protegido superan los 40 cm de altura, lo que evidencia no solo un adecuado desarrollo vegetativo sino también la eficacia del manejo aplicado en el invernadero. Este resultado demuestra que el control de variables ambientales como temperatura, humedad y riego en

invernadero ha favorecido el crecimiento vigoroso de la cebolla china, cumpliendo y superando las expectativas previstas respecto al potencial agronómico del sistema instalado.

Figura 52

Tamaño de cebolla china cosechada



Nota. Elaboración propia

5.2.2. Comparación del Peso Obtenido en la Cosecha de Cebolla China

Se sembró 3Kg de bulbos de cebolla china, con la expectativa de cosechar 6 veces ese peso en cosecha (18kg), según lo reportado por los agricultores encuestados de la localidad. Tal como se muestra en la Figura 53 el peso total cosechado de cebolla china fue de 24Kg, superando significativamente lo esperado y evidenciando un rendimiento superior al cultivo en campo abierto. Se observó también que no todas las plantas alcanzan el mismo grado de desarrollo al mismo tiempo, como es común en el cultivo de la cebolla china. Esta variabilidad de desarrollo influye directamente en el peso total de la cosecha.

Figura 53

Peso (Kg) de cebolla china cosechada



Nota. Elaboración propia

5.3. Análisis Económico

5.3.1. CAPEX

El CAPEX, o costo de capital, corresponde a los costos de todos los activos fijos necesarios para la ejecución del proyecto, los cuales generarán ganancias a largo plazo. En la Tabla 18 se detallan los costos de capital que fueron necesarios para el desarrollo de esta tesis.

Tabla 18

Costo de Capital (CAPEX)

Categoría	Bienes y Componentes	Costo Unitario (S/.)	Cantidad	Costo Total (S/.)
Construcción del Invernadero	Tubo PVC 1/2"x5m	16.00	9uds.	144.00
	Nicoll			
	Agrofilm Polibag 12x4m	18.00	12m	228.00

Categoría	Bienes y Componentes	Costo Unitario (S/.)	Cantidad	Costo Total (S/.)
	Conexión T Nicoll	2.00	16uds.	32.00
	Alambre de amarre	4.00	1kg	4.00
	Cinta teflón	1.00	1ud.	1.00
	Cintillos	7.00	2bols.	7.00
Sistema IoT	Microcontrolador ESP32-WROOM-32	35.00	1ud.	35.00
	Módulo Sensor de temperatura DHT22	22.00	1ud.	22.00
	Módulo sensor de luz BH1750	8.00	1ud.	8.00
	Sensor de humedad del suelo FC-28	3.00	3uds.	9.00
	Válvula Selenoide 1/2" 12VDC	15.00	1ud.	15.00
	Ventilador 60 Watts	50.00	1ud.	50.00
	Relé 5VDC 4 CH	8.00	1ud.	8.00
	Repetidor Wi-Fi	34.00	1ud.	20.00
	Cable UTP Cat 6	2.00	30m	60.00
	Manguera 1/8"	1.50	30m	45.00
Sistema de Riego	Goteros autocompensantes	1.00	30uds.	30.00
	Adaptador de 1/2" a 4 vías de 1/8"	6.00	1ud.	6.00
	Llave de paso de 1/2"	6.00	1ud.	6.00
Total				730.00

Nota. Elaboración Propia.

5.3.2. OPEX

El OPEX, o costo operativo, son todos los gastos operativos del proyecto. En la se presentan los costros operativos para el desarrollo de la tesis.

Tabla 19

OPEX (Costos operativos)

Ítem	Costo mensual (S/.)
Salario de tesista	200.00
Energía Eléctrica	15.00
Internet	8.00

Otros	223
Opex (total)	446.00

Nota. Elaboración propia

5.4. Análisis de Viabilidad Económica

Dado que el precio del kilogramo de la cebolla china presenta alta variabilidad estacional (entre S/1.00 y S/15.00). En Tabla 20 se muestra un calendario con eventos importantes que influyen en el precio de la cebolla china.

La oscilación del precio puede ser consecuencia de factores climáticos. En la estación lluviosa, por ejemplo, normalmente son meses de alta producción, lo que genera que la oferta supere a la demanda y, en consecuencia, el precio cae. Por otro lado, en la estación seca, donde se la producción disminuye, el precio puede subir debido a que la oferta puede ser menor que la demanda. Además del factor climático, es importante considerar los factores sociales y culturales que influyen en la demanda y el precio de la cebolla china.

En fechas festivas como la Navidad, donde tradicionalmente se consumen platos tradicionales que no requieren cebolla china, la demanda de cebolla china cae temporalmente. En contraste, en celebraciones de las fiestas patronales como el Raymi Llacta, el aumento de visitantes en la ciudad genera aumento de demanda de cebolla china en los mercados locales, provocando un alza del precio.

Por otro lado, en días previos al inicio académico (escuelas, colegios u otras instituciones educativas), la oferta de productos tiende a aumentar (incluyendo cebolla china), este incremento de oferta en el mercado suele generar la caída del precio de cebolla china.

Asimismo, durante la estación lluviosa, los excesos de lluvias no solo afectan los cultivos, sino también las condiciones de las vías de acceso a la ciudad. Si las carreteras presentan daños o bloqueos y no se solucionan con rapidez, los comerciantes tienden a reducir la cantidad de sus compras por temor a

pérdidas. Esto ocasiona acumulación de oferta sin salida, lo que a su vez provoca una baja de precios, independientemente de la cantidad producida.

Por estas razones, el análisis de rentabilidad como retorno de la inversión (ROI), periodo de retorno de la inversión (PRI) y valor neto actual (VAN) se considera escenarios adversos y favorables que reflejen la realidad de la cebolla china como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 20

Eventos importantes que pueden influir en el precio de la cebolla china

Periodo	Eventos	Tendencia del precio	Precio (S/.)
Enero		Estable/variable	6.00
Febrero	Carnaval Chachapoyano (fiesta patronal)	Al alza	7.50
Marzo	Inicio del año académico	A la baja	7.00
Abril - Mayo		Estable/Variable	10.00
Junio	Raymi llacta (fiesta patronal)	A la Alza	12.00
Julio		A la baja	8.50
Agosto	Virgen Asunta (fiesta patronal)	A la Alza	5.50
Septiembre – Noviembre	Cambio de estación	Estable/variable	5.00
Diciembre	Navidad	A la baja	4.50

Nota. Los precios presentados son referenciales y han sido obtenidos a partir de la información proporcionada por los agricultores de la localidad. Elaboración propia.

Tabla 21

Escenarios de precios de la cebolla china

Escenario	¿Cuándo se da?	Precio por Kg (S/.)	Cosecha (kg)
Pesimista	Exceso de oferta	1.50	23.5
Realista	Precio obtenido durante el ciclo de cultivo en invernadero	5.00	24

Escenario	¿Cuándo se da?	Precio por Kg (S/.)	Cosecha (kg)
Realista Alto	Precio promedio	7.00	24.5
Optimista	Alta demanda y poca oferta	10.00	25

Nota. Elaboración propia

5.4.1. Costo Inicial para la Implementación del Invernadero

En la sección anterior se calculó el CAPEX del proyecto, el resultado ascendía a S/. 730.00 para la implementación de proyecto, en la Tabla 22 resumimos los gastos para la implementación del invernadero tipo túnel de 25m² con estructura de PVC, cobertura de agrofilm y equipado con un sistema IoT que automatiza el control de riego, temperatura e iluminación.

Tabla 22

Inversión Inicial del Invernadero

Concepto	Costo (S/.)
Estructura y cobertura	416.00
Sistema IoT (Microcontrolador, actuadores y sensores, etc.)	227.00
Sistema de riego	87.00
Total	730.00

Nota. Elaboración propia.

5.4.2. Costo de Operación por Ciclo de Cultivo (45 días)

En la Tabla 23 hacemos estimación del gasto de electricidad asociado al funcionamiento del proyecto. La Tabla 24 resume los gastos necesarios para mantener operativo el invernadero por un ciclo de cultivo. Sumando todos los gastos se obtiene un costo operativo es de S/.22.60 por ciclo de cultivo en un invernadero automatizado de área de 25m² por cada ciclo de cultivo.

Tabla 23*Consumo de electricidad kWh del sistema IoT*

Componentes	Tiempo (horas)	Consumo (kWh)
Ventilador 60 Watts	132.4	10.5
Cinta LED 20 Watts	84.5	1.69
Esp32-WROOM-3D (modo mixto) + sensores ≈0.0594Watts	1080	1.95
electroválvula 6W	29.4	0.17
Total		≈14.31

Nota. Cálculos referenciales. Elaboración propia**Tabla 24***Gasto invertido en un ciclo de cultivo de cebolla china*

ítem	Cantidad	Precio (S/.)	Total (S/.)
Bulbos de cebolla china	3kg	2.00	6.00
Abono	1Kg	3.00	3.00
Electricidad	14.3kWh	0.67	9.60
Mano de obra (1 hora)	1	4.00	4.00
Total			22.6

Nota. El precio de la electricidad puede fluctuar de acuerdo con las tarifas de electricidad. Elaboración propia**5.4.3. Ganancia Neta del Cultivo de Cebolla China Cosechada**

Se cosecharon 24kg de cebolla china el cual se vendió en la modalidad por lote completo a un precio de S/5.00 por kilogramo.

Utilizando la ecuación (5) se calculó la ganancia bruta, obteniéndose S/ 120.00 de resultado. El costo de operación fue determinado anteriormente (S/ 22.60). Al reemplazar estos valores en la ecuación (6), se obtiene una ganancia neta es S/ 97.40

Cálculo de la ganancia bruta:

$$\text{Ganancia}_{\text{bruta}} = \text{Peso}_{\text{total}} \times \text{precio}_{\text{x kilo}} \quad (5)$$

$$\text{Ganancia}_{\text{bruta}} = 24 \times 5 = 120.00$$

Cálculo de la ganancia neta:

$$\text{Ganancia}_{\text{neta}} = \text{Ganancia}_{\text{bruta}} - \text{costo}_{\text{operación}} \quad (6)$$

$$\text{Ganancia}_{\text{neta}} = 120 - 22.60 = 97.40$$

En la Tabla 25 se presenta las posibles ganancias durante un año de siembra de cebolla china.

Tabla 25

Ganancia neta de 8 ciclos de cultivo de cebolla china

N°	Inicio	Fin	Cosecha (kg)	Precio (S/.)	Ganancia bruta (S/.)	Costo de Operación (S/.)	Ganancia Neta (S/.)
1	04/10	12/11	24	5.00	120.00	22.60	97.40
2	13/11	22/12	24	4.50	108.00	22.60	85.40
3	23/12	31/01	24	6.00	144.00	22.60	121.40
4	01/02	12/03	24	7.50	188.00	22.60	157.40
5	13/03	21/04	24	7.00	168.00	22.60	145.40
6	22/04	31/05	24	10.00	240.00	22.60	217.40
7	01/06	10/07	24	12.00	288.00	22.60	265.40
8	11/07	19/08	24	8.50	204.00	22.60	181.40
9	20/08	31/09	24	5.50	132.00	22.60	109.40
Total			216		1,592.00	203.40	1,380.60

Nota. Los precios son referenciales del año 2024, se consideró que el ciclo de cultivo son 40 días, ya que esto depende de la estimación del agricultor. Elaboración propia.

5.4.4. Retorno de la Inversión (ROI)

El ROI permite medir la rentabilidad a corto plazo de una inversión en relación de su costo inicial. Consideran que la duración del ciclo de cultivo de cebolla china es de 6 semanas (menor a un año), se calculó el ROI por ciclo de cultivo.

Tal como se muestra en la ecuación (8), el ROI se calcula dividiendo la ganancia neta entre la inversión inicial, y multiplicado el resultado por 100.

El costo de implementación se determinó en la, con un valor de S/ 730.00. El Costo de operación se calculó en las secciones anteriores, resultando S/. 22.60. Al reemplazar estos valores, se obtuvo una inversión inicial de S/ 752.60.

Por último, al reemplazar estos valores en la ecuación (8), se obtuvo que el ROI es 12.94%, un valor positivo que refleja rentabilidad a corto plazo.

Cálculo de la inversión inicial:

$$\begin{aligned} \text{Inversión}_{\text{inicial}} &= \text{costo}_{\text{implementación}} + \text{costo}_{\text{operación}} & (7) \\ \text{Inversión}_{\text{inicial}} &= 730 + 22.60 = 752.60 \end{aligned}$$

Cálculo del ROI:

$$\begin{aligned} \text{ROI} &= \frac{\text{Ganancia}_{\text{neta}}}{\text{Inversión}_{\text{inicial}}} \times 100 & (8) \\ \text{ROI} &= \frac{97.40}{752.60} \times 100 = 12.94\% \end{aligned}$$

5.4.5. Periodo de Recuperación de la inversión (PRI)

Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) es el tiempo de retorno de inversión, se calcula al dividir la inversión inicial entre la ganancia neta como se muestra en la ecuación (9). La inversión inicial se calculó en secciones anteriores, resultando S/ 752.60. De acuerdo con la Tabla 25 la ganancia neta en un año de producción de cebolla china sería de S/ 1380.60, aplicando estos valores a la ecuación (9) obtenemos que el periodo de retorno de la inversión es 7 meses, equivalente a aproximadamente 5 ciclos de cultivo de cebolla china.

$$\text{PRI} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Ganacia Neta}} \quad (9)$$

$$PRI = \frac{752.60}{1,380.60} = 0.54 \approx 7 \text{ meses}$$

5.4.6. Valor Actual Neto (VAN)

El valor actual neto (VAN) es un indicador financiero para evaluar la viabilidad económica del proyecto a largo plazo. El VAN se calcula como se muestra en la ecuación (10). Para este análisis se consideró la vida útil del invernadero de 4 años, la ganancia neta anual estimada de S/ 1,380.60. Asimismo, se utilizó la tasa descuento del 10%, que es la rentabilidad mínima aceptada para inversiones agrícolas de riesgo moderado.

Para el cálculo se considera que la ganancia neta se mantiene constante durante los 4 años de vida útil del invernadero. Aplicando los valores, el valor del VAN resultó de S/ 3,624.00.

Cabe señalar que en este cálculo no se han incluido gastos adicionales como el recambio de sensores y otros gastos de mantenimiento que pueda haber a lo largo de 4 años. No obstante, el resultado obtenido permite concluir que, además de recuperar la inversión inicial, el proyecto podría generar un excedente económico significativo.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{\text{Ganancia neta}_t}{(1 + \text{tasa de descuento})^t} - \text{Inversión inicial} \quad (10)$$

$$VAN = \frac{1,380.60}{(1+0.10)^1} + \frac{1,380.60}{(1+0.10)^2} + \frac{1,380.60}{(1+0.10)^3} + \frac{1,380.60}{(1+0.10)^4} - 752.60$$

$$VAN = 3,624.30$$

5.4.7. Cálculo de ROI, PRI y VAN Considerando Escenarios

Los precios de la Tabla 25 son valores referenciales correspondiente al año 2024, los cuales podrían variar. Por esta razón, en la Tabla 26 se exponen los cálculos de ROI y PRI considerando los escenarios definidos en la Tabla 21. Se observa que el proyecto es altamente sensible al precio de venta de la

cebolla china, lo cual lo convierte en un factor importante en la evaluación de su rentabilidad. A medida que el precio se incrementa, en los escenarios realista alto y escenario optimista, el ROI mejora significativamente y el PRI se reduce, haciendo que el proyecto sea atractivo incluso a corto plazo. El escenario realista bajo, si bien el PRI aumenta, según el valor del ROI, mantiene la rentabilidad a mediano plazo

Tabla 26

Cálculo por ciclo de cultivo (mes y medio) del retorno de inversión (ROI) y periodo de retorno de la inversión (PRI) considerando escenarios

Escenario	Precio por Kg (S/.)	Cosecha (kg)	Ganancia bruta (S/.)	Ganancia Neta (S/.)	ROI	PRI
Pesimista	1.50	23.5	35.25	11.75	1.56%	64.05
Realista Bajo	5.00	24	120.00	97.4	12.94%	7.72
Realista Alto	7.00	24.5	171.50	148.90	19.78%	5.05
Optimista	10.00	25	250.00	227.40	30.21%	3.30

Nota. Elaboración propia

Tabla 27

Ganancia neta anual por escenarios

Escenario	Ciclos	Tasa de descuento	Ganancia Neta por ciclo de cultivo (S/.)	Ganancia Neta Anual (S/.)	VAN (S/.)
Pesimista	9	10%	11.75	105.75	-417.36
Realista Bajo	9	10%	97.40	876.60	2,024.86
Realista Alto	9	10%	148.90	1,340.10	3,495.05
Optimista	9	10%	227.40	2,046.60	5,734.68

Nota. Para el cálculo del VAN se utilizó la ecuación (10) y la inversión inicial S/ 752.60. Elaboración propia

Las siguientes ecuaciones se usaron para calcular el valor VAN de la Tabla 27.

Aplicando la ecuación (10) para el escenario pesimista:

$$VAN = \frac{105.75}{(1+0.10)^1} + \frac{105.75}{(1+0.10)^2} + \frac{105.75}{(1+0.10)^3} + \frac{105.75}{(1+0.10)^4} - 752.60$$

$$VAN = -417.36$$

Aplicando la ecuación (10) para el escenario realista bajo:

$$VAN = \frac{876.60}{(1+0.10)^1} + \frac{876.60}{(1+0.10)^2} + \frac{876.60}{(1+0.10)^3} + \frac{876.60}{(1+0.10)^4} - 752.60$$

$$VAN = 2,024.86$$

Aplicando la ecuación (10) para el escenario realista alto:

$$VAN = \frac{1,340.10}{(1+0.10)^1} + \frac{1,340.10}{(1+0.10)^2} + \frac{1,340.10}{(1+0.10)^3} + \frac{1,340.10}{(1+0.10)^4} - 752.60$$

$$VAN = 3,495.05$$

Aplicando la ecuación (10) para el escenario optimista:

$$VAN = \frac{2,046.60}{(1+0.10)^1} + \frac{2,046.60}{(1+0.10)^2} + \frac{2,046.60}{(1+0.10)^3} + \frac{2,046.60}{(1+0.10)^4} - 752.60$$

$$VAN = 5,734.68$$

5.4.8. Proyección a 250m² (área de una parcela)

Para la proyección a escala comercial, se aplicaron criterios de ingeniería de escalamiento en lugar de una proyección lineal simple. Se consideraron:

Robustez estructural: Cambio de PVC a madera para resistencia eólica.

Hidráulica: Dimensionamiento de tuberías matrices y accesorios para compensar pérdidas de carga.

Zonificación: Incremento en la cantidad de sensores y actuadores para garantizar la cobertura de control en una superficie mayor.

Economía de escala: Dilución de costos fijos (conexión a internet, unidad de control central) entre una mayor área productiva.

Costo inicial de implementación del invernadero. Cabe resaltar que para un invernadero de 250m², no sería viable utilizar tubos PVC para su construcción como un invernadero de pequeña escala. Sin embargo, se podría optar por un invernadero de dos aguas (Ver Sección 2.1.7) una

alternativa para invernadero de grandes superficies.

Además, dado que los agricultores de la localidad tienen a acceso a madera, especialmente de árboles de eucalipto, este material puede usarse para la estructura, lo que reduciría significativamente el costo de inversión.

Considerando que la dimensión del invernadero podría ser de 10 m de largo por 25 m de ancho, de dos metros la altura más baja y 3 m la altura más alta, los gastos ascenderían aproximadamente a S/ 2,998.00 considerando que la madera no tendrá costo.

Tabla 28

Gastos iniciales para un invernadero de 250m²

Productos	cantidad	Precio	Total
Agrofilm 6x50	1 rollo	750.00	750.00
Clavos, Tornillos, grapas y fijaciones	2 kg	≈20.00	40.00
Gasolina	2 L	17.00	34.00
Alquiler de motosierra + mano de obra	1 día	50.00	50.00
Microcontrolador ESP32-WROOM-32	5 uds.	35.00	175.00
Módulo Sensor de temperatura DHT22	2 uds.	22.00	44.00
Módulo sensor de luz BH1750	1ud.	8.00	8.00
Sensor de humedad del suelo FC-28	20	3.00	60.00
Válvula Selenoide 3/4" 12VDC	1	15.00	15.00
Ventilador 200 Watts	6	124.00	764.00
Relé 5VDC 4 CH	1ud.	8.00	8.00
Repetidor Wi-Fi	1ud.	34.00	34.00
Cable UTP Cat 6	30 m	2.00	60.00
Mangueras de riego por goteo 500m	1 kit	750.00	750
Tanque de agua	1	200.00	200.00
Llave de paso de 3/4"	1	6.00	6.00
Total			2,998.00

Nota. Los precios son referenciales y podrían estar sujetos a variaciones o requerir gastos adicionales no considerados en la tabla. Elaboración propia

Costo de Operación. Los gastos de operación de un ciclo de cultivo de cebolla china en un invernadero de 250m² de acuerdo con la Tabla 29 sería de S/ 250.98

Tabla 29

Proyección proporcional de gastos en un invernadero de 250m²

ítem	Cantidad	Precio(S/.)	Total (S/.)
Bulbos de cebolla china	30kg	2.00	60.00
Abono	10Kg	4.00	40.00
Electricidad	92kWh	0.8258	75.98
Mano de obra	2	30.00	60.00
Transporte	1	15.00	15.00
Total			250.98

Nota. Elaboración propia

Ganancia Neta. Considerando de que la producción es proporcional al área del invernadero, en un área de 250 m² se podría cosechar 240 kg, en la Tabla 30 se calculan las ganancias netas en un ciclo de cultivo considerando escenario en el cual se podría vender la cosecha.

Tabla 30

Escenarios de ganancia de la cebolla china en la proyección de un invernadero de 250m²

Escenario	Precio (S/.)	Ganancia bruta (S/.)	Inversión (S/.)	Ganancia neta (S/.)
Pesimista	1.50	360.00	245.98	114.02
Realista Bajo	5.00	1,080.00	245.98	834.02
Realista Alto	7.00	1,680.00	245.98	1434.00
Optimista	10.00	2,400.00	245.98	2154.02

Nota. Para los cálculos se considera 240 kg de cosecha de cebolla china. Elaboración propia

Cálculo del ROI, PRI para un invernadero automatizado de 250 m². En la sección anterior se obtuvo que el costo inicial es de S/. 2998.00 y el costo de operación fue de S/. 250.98. Además, en la Tabla 30 se muestra la ganancia neta por escenario.

La Tabla 31 muestra los resultados del PRI y ROI que permiten concluir que

el sistema de invernadero automatizado es económicamente viable en la mayoría de los escenarios, y especialmente rentable en condiciones de escenarios favorables. Incluso en el escenario pesimista, se mantiene operativo sin generar pérdidas. La rapidez con la que se podría recuperar la inversión en los escenarios realista alto y optimista refuerza la propuesta como una alternativa sostenible frente al cultivo tradicional en campo abierto.

Tabla 31

Cálculo de ROI y PRI para un invernadero de 250 m²

Escenario	Precio por Kg (S/.)	Ganancia Neta (S/.)	ROI	PRI
Pesimista	1.50	114.02	3.50%	28.49
Realista Bajo	5.00	834.02	25.67%	3.89
Realista Alto	7.00	1434.00	44.13%	2.26
Optimista	10.00	2154.02	66.529%	1.50

Nota. La inversión inicial es S/ 3,248.98, suma del costo inicial más el costo de operación. Elaboración propia.

5.4.9. Cultivo Tradicional vs. Cultivo en invernadero de Cebolla China

Según las mediciones del prototipo de invernadero de 25 m² en un ciclo de cultivo se gastó 2,048 L de agua en el riego (ver Sección 5.1), considerando una proyección lineal, en un invernadero de 250 m² se consumirá 20,480 L de agua.

En la Sección 5.1.16. se determinó teóricamente que se gasta 77, 220 L de agua en una parcela promedio de 250 m² durante un ciclo de cultivo de cebolla china de forma tradicional.

En la Tabla 32 se comparan los dos tipos de cultivo, estos datos permiten concluir que el sistema de cultivo en invernadero representa una mejora significativa frente al método tradicional (cielo abierto).

El incremento del 33% de producción indica mayor aprovechamiento del

espacio, y mayor protección de la planta, lo que favorece su desarrollo más completo y permite obtener mayor peso por planta cosechada, lo que se traduce directamente en un mayor rendimiento productivo.

La reducción del agua en un 74% pone en evidencia una ventaja ambiental importante, especialmente en la estación seca donde el agua escasea y la distribución es desigual.

Tabla 32

Comparación de cultivo tradicional vs. cultivo en invernadero de cebolla china

Variable	Tradicional (250m²)	Invernadero (250m², proyección)	Diferencia
Inversión total	S/. 200	S/. 250.98	+25.49%%
Bulbos sembrados	30kg	30kg	0%
Producción Total	≈180Kg	≈240Kg	+33%
Consumo de agua	77 220 L	20 480 L	-73.48%

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

6.1. Discusión por Objetivos Específicos

Objetivo Específico 1. “Determinar los factores más importantes que mejoren la producción de cebolla china en un invernadero en el anexo de Taquia”

Los factores más relevantes identificados para mejorar la producción de cebolla china fueron la temperatura, la iluminación, la humedad del suelo y el control del riego. Estos resultados fueron obtenidos mediante revisión bibliográfica y la encuesta aplicada a los agricultores de la localidad de Taquia.

La literatura técnica respalda esta selección. Según Huamán et al. (2020), la cebolla china requiere condiciones específicas para un crecimiento óptimo: temperaturas entre 18 °C y 26 °C, humedad del suelo entre 70% y 80%, e iluminación solar de 14 a 16 horas. Si bien los rangos establecidos fueron suficientes para el diseño del prototipo, futuros estudios podrían optimizar estos parámetros con mayor granularidad para maximizar aún más el rendimiento.

En síntesis, el objetivo se cumplió satisfactoriamente y proporcionó la base técnica para el proyecto.

Objetivo Específico 2: “Diseñar un sistema de invernadero inteligente de bajo costo para satisfacer los factores más importantes que mejoren las condiciones para el cultivo continuo de cebolla china”

El diseño del sistema IoT consideró la integración de sensores económicos (DHT22 para temperatura, FC-18 para humedad del suelo, YF-S201 para el flujo de agua y BH-1750 para la iluminación), actuadores (válvula solenoides,

ventilador, cinta LED) y un microcontrolador ESP32 con conectividad Wi-Fi.

Este sistema de bajo costo demostró la capacidad de registrar, procesar y controlar variables de forma autónoma y en tiempo real.

Objetivo Específico 3: “Implementar un prototipo de invernadero inteligente para el cultivo continuo de cebolla china durante todo el año”

El prototipo del invernadero inteligente fue construido e instalado en una parcela de prueba ubicada en la huerta del autor en la localidad de Taquia. Las pruebas de funcionamiento se realizaron durante dos meses. Logrando mantener un ambiente controlado dentro del invernadero.

Comparando el consumo de agua por riego tradicional y el riego controlado en el cultivo de cebolla china se observa una reducción del 70%. Esto se debió a que solo se riega lo necesario. Además, se observó cualitativamente una mejor uniformidad de la cosecha obtenida.

Estos resultados confirman que el sistema alcanzó el control autónomo de las variables críticas (riego, iluminación y ventilación) frente a las perturbaciones climáticas presentadas. La estabilidad operativa demostrada durante este periodo permite inferir técnicamente que el prototipo posee la capacidad funcional para sostener las condiciones de cultivo requeridas durante el ciclo anual completo.

Por lo tanto, se considera el objetivo alcanzado, al haber obtenido un prototipo de invernadero con un sistema funcional capaz de operar de manera continua y automatizada.

Objetivo Específico 4: “Analizar la viabilidad económica en el uso de invernadero inteligente de bajo costo para el consumo eficiente de agua y mejorar la calidad de producción de cebolla china en la localidad de Taquia”

A pesar de que el costo de implementación del prototipo escalado (S/ 2,998 para 250 m²) es superior a la siembra convencional, los indicadores

financieros son positivos. En los escenarios Realista Bajo y Realista Alto (precios de S/ 5.00 y S/ 7.00 por kg), el sistema demuestra una alta viabilidad financiera. El ROI oscila entre el 25.67% y el 44.13% por ciclo, lo que indica que por cada sol invertido se genera una ganancia operativa significativa.

El indicador más importante, el PRI, revela que en un escenario conservador (Realista Bajo), la inversión total de S/ 3,248.98 se recupera en apenas 3.89 ciclos productivos (aproximadamente 6 meses). Esto desvirtúa la barrera de entrada del costo inicial, demostrando que la tecnología se amortiza en menos de un año.

Si bien el agua en la localidad no representa un costo directo de facturación, su escasez en la estación seca representa un alto costo de oportunidad. Esto implica que el agricultor puede garantizar campañas de siembra en la época seca. Accediendo a los precios de venta "Optimistas" (S/ 10.00/kg) identificados en el estudio de mercado, momentos en los cuales la agricultura tradicional reduce su oferta de cebolla china por falta de riego.

Por lo tanto, el proyecto se concluye como técnica y económicamente viable, lo que moderniza la forma de cultivo y asegura la sostenibilidad económica del agricultor de la localidad de Taquia.

6.2. Discusión de las Hipótesis Específicas

Hipótesis Especifica 1: *“Los factores ambientales como la temperatura, humedad, iluminación y riego automatizado influyen en la producción de cebolla china en un invernadero en el anexo de Taquia”*

La investigación confirmó que estos factores son determinantes para el rendimiento del cultivo, y su regulación contribuye a una producción más estable y de mejor calidad.

Hipótesis Especifica 2: *“Es posible diseñar un sistema de invernadero*

inteligente de bajo para controlar de forma eficiente los factores críticos para el cultivo de cebolla china”

El diseño propuesto fue funcional y operativamente efectivo, integrando sensores, actuadores y controladores de bajo costo, cumpliendo con los requisitos técnicos definidos.

Hipótesis Específica 3: *“El prototipo de invernadero inteligente permite mantener condiciones ambientales estables, lo que permitirá el cultivo continuo de cebolla china durante todo el año en la localidad de Taquia”*

La respuesta del sistema ante las variaciones climáticas registradas (días soleados, nublados, cambios de temperatura) demuestra técnicamente que el prototipo mantiene la estabilidad requerida independientemente de la estacionalidad. La lógica de control operó correctamente, lo que permite confirmar la capacidad del sistema para sostener la producción continua durante el ciclo anual y lograron que solo se consuman 20,480 litros frente a los 77,220 teóricos del riego tradicional. Esto demuestra una eficiencia técnica del 74%.

Hipótesis Específica 4: *“La implementación de un invernadero inteligente de bajo costo permite un uso eficiente del agua y mejora la calidad de producción de cebolla china, resultando económicamente viable en la localidad de Taquia”*

Los resultados muestran una mejora en la eficiencia hídrica y un crecimiento más uniforme del cultivo, con una inversión inicial asequible, confirmando la viabilidad del sistema. Además, los indicadores financieros indican que el proyecto es viable.

6.3. Implicancias técnicas y económicas

El proyecto demuestra que el uso de tecnologías IoT puede adaptarse a contextos de producción agrícola de pequeña escala, brindando herramientas accesibles para mejorar el rendimiento, reducir costos y hacer un uso más

racional de los recursos hídricos.

6.4. Discusión del Objetivo General

Objetivo General: *“Diseñar e implementar un invernadero inteligente de bajo costo para mejorar la producción continua de cebolla china en la localidad de Taquia mediante tecnologías IoT”*

El desarrollo del proyecto logró articular adecuadamente los cuatro objetivos específicos, generando un sistema funcional, automatizado, y replicable. Se diseñó e implementó una solución técnica de bajo costo que respondió a los requerimientos agronómicos y permitió una primera validación exitosa en campo. Por ello, se considera que el objetivo general fue alcanzado satisfactoriamente.

6.5. Discusión de la Hipótesis General

Hipótesis General: *“Un sistema de invernadero inteligente de bajo costo basado en tecnologías IoT permite mejorar las condiciones de producción continua de cebolla china en Taquia, optimizando el uso de recursos como el agua”*

Los resultados obtenidos respaldan esta hipótesis. El prototipo controló variables ambientales críticas, redujo el uso de agua y mejoró la calidad de las plantas cultivadas. Por lo tanto, los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis general, validando la pertinencia del enfoque tecnológico adoptado.

6.6. Fortalezas y limitaciones

6.6.1. Fortalezas

- Cobertura 94.5 % de agricultores (52/55), lo que implica alta validez externa.

6.6.2. Limitaciones

El análisis económico y productivo a escala de 250 m² se basa en una proyección paramétrica a partir de los datos experimentales.

Si bien los costos de implementación fueron ajustados considerando criterios de ingeniería (cambio de materialidad estructural y redimensionamiento de la red de sensores), la proyección asume un comportamiento proporcional en el rendimiento biológico y consumo hídrico.

Esta aproximación no contempla variables emergentes propias de una mayor escala, tales como la variabilidad de microclimas en áreas extensas, pérdidas de carga hidráulica no simuladas o la complejidad logística de comercializar un volumen de cosecha diez veces mayor en el mercado local.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- ❖ El sistema de invernadero automatizado con un sistema IoT permitió cultivar cebolla china en condiciones controladas de temperatura, humedad del suelo y luminosidad, logrando una producción de 24 kg en un área de 25 m² durante un ciclo de 45 días.
- ❖ El control automatizado de riego, basado en sensores de humedad del suelo y lógica de histéresis, permitió mantener la humedad entre 50% y 75% durante la mayor parte del ciclo de cultivo, con un consumo de 2, 048 litros de agua por ciclo de cultivo. Este resultado evidencia un uso eficiente del agua en comparación con el riego tradicional.
- ❖ Se identificaron como factores clave para cultivar cebolla china la estabilidad de la humedad del suelo, el control de temperatura y la iluminación artificial. Estas variables contribuyeron al desarrollo homogéneo de la cebolla china.
- ❖ La implementación del prototipo fue viable con una inversión inicial de S/ 752.60 y el costo operativo por ciclo de cultivo fue de S/ 22.60. Con un precio de venta real de S/ 5.00/kg, se obtuvo una ganancia neta de S/ 834.02 por ciclo de cultivo.
- ❖ El análisis económico permitió calcular un retorno sobre la inversión (ROI) del 12.94% y un periodo de recuperación de 7 ciclos de cultivo, lo que demuestra la viabilidad económica del sistema en condiciones reales de mercado.
- ❖ El análisis de sensibilidad para un invernadero de 250m² mostró que el sistema es rentable incluso ante escenarios de precios bajos. En

condiciones optimistas (S/ 10/kg), el ROI se eleva al 66.52% y la recuperación de la inversión se alcanza en solo 1.5 ciclos de cultivo.

- ❖ En comparación con el cultivo a campo abierto, el cultivo en invernadero posibilita extender el cultivo de 9 ciclos en comparación a los 6 cultivos promedios en la localidad de Taquia.
- ❖ La automatización de un invernadero genera un ambiente ideal para el cultivo de cebolla china lo que indica su potencial para extender la producción de cebolla china incluso en la estación seca. Esto podría contribuir a un abastecimiento continuo de cebolla china durante todo el año.

7.2. Recomendaciones

- Se recomienda implementar el sistema a mayor escala con el fin de evaluar su comportamiento frente a desafíos logísticos, de mantenimiento y de comercialización asociados a volúmenes de producción más altos
- Se recomienda emplear el protocolo MQTT en implementaciones de invernaderos a mayor escala o en escenarios donde se requiera la visualización de datos en tiempo real con menor latencia, dado que este protocolo optimiza la transmisión eficiente y confiable de información en sistemas IoT.
- Los sensores FC-28 son una opción muy económica, sin embargo, presentan baja resistencia a la corrosión, lo que reduce significativamente su vida útil en aplicaciones prolongadas. Se recomienda evaluar la conveniencia de invertir en sensores de mayor calidad y precisión (no restringidos únicamente al modelo FC-28), especialmente en proyectos de largo plazo que demanden confiabilidad y continuidad en las mediciones.
- Para zonas alejadas sin acceso estable a la red eléctrica o a infraestructura de telecomunicaciones, se recomienda el uso de paneles solares y tecnologías de comunicación de bajo consumo energético, como LoRaWAN, en lugar de Wi-Fi, ya que permiten transmisiones a larga distancia con un consumo reducido de energía, lo cual resulta más

adecuado para contextos rurales o de difícil acceso.

- Incorporar un sistema de respaldo energético o fuentes renovables (como paneles solares) para garantizar la continuidad operativa en caso de cortes eléctricos. Esto es especialmente importante en áreas donde no se puede acceder al suministro eléctrico
- Optimizar la lógica de control con técnicas más avanzadas, como lógica difusa o control PID, para reducir el consumo energético y mejorar la precisión del riego y ventilación.
- Implementar un sistema de almacenamiento (tanques) de agua para la estación seca a fin de tener agua de respaldo y se recomienda a la comunidad o las autoridades la construcción de reservorios de almacenamiento de agua que permitan el abastecimiento continuo del recurso hídrico.
- Considerar la integrar nuevos sensores (como sensores de CO₂ o PH) para obtener más variables de análisis y mejorar el control del cultivo.
- La variabilidad del precio de cebolla china es muy variable por lo que puede generar pérdidas, lo recomendable es diversificar los cultivos para reducir riesgos económicos.
- Realizar un estudio factorial controlado (screening + optimización), en el cual se manipulen simultáneamente las variables controladas dentro del invernadero automatizado. Dicho estudio permitiría cuantificar la contribución estadística de cada factor al rendimiento y la calidad del cultivo, y establecer cuáles son esenciales para el control automático y cuáles poseen menor impacto.
- Realizar una evaluación comparativa de otros cultivos de ciclo corto (como lechuga, cilantro o rabanito) en el mismo sistema, a fin de diversificar la producción y maximizar el uso del invernadero.

CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA

Alfordson. (n.d.). *ALFORDSON Greenhouse Aluminium Polycarbonate Garden Storage Shed 5.1x2.4x2.1M*. Retrieved November 27, 2024, from <https://www.alfordson.com.au/alfordson-greenhouse-aluminium-polycarbonatel-gard~203780>

ALLDATASHEET. (n.d.). *ALLDATASHEET.COM - Electronic Parts Datasheet Search*. Retrieved July 8, 2025, from <https://www.alldatasheet.com/>

Aosong(Guangzhou) Electronics Co. (n.d.). *Datasheet DHT22*. Retrieved July 8, 2025, from <http://www.aosong.com>

ArchiExpo Connect. (n.d.). *Ventilador para invernadero - Todos los fabricantes de la arquitectura y del design*. Retrieved December 30, 2024, from <https://www.archiexpo.es/fabricante-arquitectura-design/ventilador-invernadero-17708.html>

Arduino. (n.d.-a). *Arduino® UNO R4 WiFi — Arduino Online Shop*. Retrieved September 13, 2024, from <https://store-usa.arduino.cc/products/uno-r4-wifi>

Arduino. (n.d.-b). *Arduino*. Retrieved December 18, 2024, from <https://www.arduino.cc/>

Berrios Gómez, S. (2022). *Diseño de un sistema IoT para el monitoreo y control del cultivo de lechugas en un invernadero*. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/2362>

Bersani, C., Ruggiero, C., Sacile, R., Soussi, A., & Zero, E. (2022). Internet of Things Approaches for Monitoring and Control of Smart Greenhouses

in Industry 4.0. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 3834, 15(10), 3834.
<https://doi.org/10.3390/EN15103834>

CABI. (2021). *Fusarium oxysporum f.sp. cepae* (basal rot of onion). *CABI Compendium*. <https://doi.org/10.1079/CABICOMPENDIUM.24624>

Cai, H., Xu, B., Jiang, L., & Vasilakos, A. V. (2017). IoT-Based Big Data Storage Systems in Cloud Computing: Perspectives and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(1), 75–87.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2619369>

Calua Chuquimango, C. W. (2016). Fitopatógenos fungosos en el cultivo de cebolla china (*Allium cepa* var. *Aggregatum* G. Don) en Cajamarca. *Universidad Nacional de Cajamarca*.
<http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1776>

Camara Valencia. (n.d.). *Dispositivos (I) Internet de las cosas (IoT): Capítulo 14 | Guía de Industria 4.0*. Retrieved December 18, 2024, from <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-14-dispositivos-i-internet-de-las-cosas-iot/>

Dewesoft. (n.d.). *PID Control* | Dewesoft. Retrieved July 8, 2025, from https://training-dewesoft-com.translate.google.com/online/course/pid-control?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

Electromania Peru. (n.d.). Retrieved July 8, 2025, from <https://www.electromania.pe/>

Espressif. (2023). *ESP32WROOM32 Datasheet*. <https://www.espressif.com/en/support/download/documents>.

Farooq, M. S., Riaz, S., Helou, M. A., Khan, F. S., Abid, A., & Alvi, A. (2022). Internet of Things in Greenhouse Agriculture: A Survey on Enabling Technologies, Applications, and Protocols. *IEEE Access*, 10, 53374–53397. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3166634>

- Firstpro. (n.d.). *Ventilador Pedestal Bossko BK-8219VI De 18" 200 Watts*. Retrieved July 8, 2025, from <https://insumosfirstpro.com/wp-content/uploads/2024/04/Ventilador-Pedestal-Bossko-BK-8219VI.pdf>
- Foshan Shunde Zhongjiang Energy Saving Electronics Co. (n.d.). *YF-S201 black flow sensor*. Retrieved July 8, 2025, from www.fssdyifa.com.cn
- Gomez Pacci, G. N. (2019). *Diseño e implementación de un controlador difuso utilizando Arduino para la automatización de un mini invernadero de rosas*. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/2085>
- Gómez-Chabla, R., Real-Avilés, K., Morán, C., Grijalva, P., & Recalde, T. (2019). IoT Applications in Agriculture: A Systematic Literature Review. *ICT for Agriculture and Environment*, 901, 68–76. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10728-4_8
- Google Earth. (2025). *Taquia - Google Earth*. <https://earth.google.com/web/@-6.25435286,-77.83370438,2582.24626201a,1000d,30y,0h,0t,0r/data=CgRCAggBMi kKJwolCiExRHFxUUNOUXpzRnFFamILdnE0Y0NCTIZVNG9FdERLU 2UgAToDCgEwQgIIAEoICLLMxtEBEAE>
- Google Maps. (2025). *Taquia - Google Maps*. <https://www.google.com/maps/place/Taquia+01000/@-6.2547817,-77.8538975,14z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x91b6aca8830db6cd:0x55decba85676e0aa!8m2!3d-6.2547822!4d>
- Handson Technology. (n.d.). *BH1750 Ambient Light Sensor Module*. Retrieved July 8, 2025, from www.handsontec.com
- Hernando Núñez del Prado Simons. (2018). *Problemática geotécnica en la ciudad de Chachapoyas, Región Amazonas*. www.sgp.org.pe
- Hosny, K. M., El-Hady, W. M., & Samy, F. M. (2024). Technologies, Protocols, and applications of Internet of Things in greenhouse Farming: A survey

of recent advances. In *Information Processing in Agriculture*. China Agricultural University. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2024.04.002>

Huaraca Ramos, P. J. (2015). *Evaluación de cuatro dosis de tri hormona enriquecido con micro nutrientes*. <http://hdl.handle.net/11458/679>

IGP. (n.d.). *El clima en el Perú: Chachapoyas*. Retrieved February 27, 2025, from <http://met.igp.gob.pe/clima/HTML/chachapoyas.html>

INTAGRI. (n.d.). *Pudrición Blanca (Sclerotium cepivorum) en el Cultivo de Cebolla* | Intagri S.C. Retrieved March 14, 2025, from <https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/pudricion-blanca-sclerotium-cepivorum-en-el-cultivo-de-cebolla>

INTAGRI. (2021). Aspectos a Considerar en la Orientacion de los Invernaderos. In *Artículos Técnicos de INTAGRI*. <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/aspectos-a-considerar-en-la-orientacion-de-los-invernaderos>

Invernaderos Argentina. (n.d.). *Invernaderos Premium de Aluminio*. Retrieved January 1, 2025, from <https://invernaderosargentina.com/?fbclid=PAZXh0bgNhZW0CMTEAAaYgRfKwZpFGynqnyJB4hVRWMymxVT8IJepflt9RUCbXqIDgmmNMI SnRFTM>

INVESA. (n.d.). *Mancha púrpura - Invesa - La Compañía Amiga*. Retrieved March 14, 2025, from <https://www.invesa.com/product/mancha-purpura/>

Invesa. (n.d.). *Mancha púrpura - Invesa - La Compañía Amiga*. Retrieved July 8, 2025, from https://www.invesa.com/product/mancha-purpura/?srsltid=AfmBOorDdoaaC_aST5Hsi2VxlbN4hIB3NZ8U9GXvq5kkTbQEuNU8mNdX

- Ishaq, K., & Farooq, S. S. (n.d.). Exploring IoT in Smart Cities: Practices, Challenges and Way Forward. *ArXiv*, *abs/2309.12344*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2309.12344>
- IThink. (n.d.). *SQL, NoSQL, NewSQL. Qué son, historia y elección*. Retrieved December 20, 2024, from <https://www.ithinkupc.com/es/blog/sql-nosql-newsqli-que-son-historia-y-eleccion/>
- Johana, S., Yeni, N.-V., & Giraldo, R. (n.d.). *Materiales de cubierta y cerramiento para la construcción de invernaderos: criterios técnicos para su selección*.
- Kim, T. hoon, Ramos, C., & Mohammed, S. (2017). Smart City and IoT. *Future Gener. Comput. Syst.*, 76, 159–162. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2017.03.034>
- La Tienda del Invernadero. (n.d.). *¿CÓMO DIFERENCIAR INVERNADEROS BARATOS FRENTE A UNO DE CALIDAD PROFESIONAL? - latiadadelinvernadero.com*. Retrieved January 1, 2025, from <https://latiadadelinvernadero.com/blog/general/como-diferenciar-invernaderos-baratos-frente-a-uno-de-calidad-profesional>
- Larico Infa, E. L. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de control y automatizado para la etapa de germinación y acondicionamiento de lechugas hidropónicas de la empresa Fagsol S.A.C. monitoreado a tiempo real*. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/86e476ef-1b42-46bf-88aa-e1781c559bf3>
- Lee, I., & Lee, K. (2015a). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/J.BUSHOR.2015.03.008>
- Lee, I., & Lee, K. (2015b). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/J.BUSHOR.2015.03.008>

Made in China. (2025). *Tubérculo seco natural de semilla de cebolla china*.
https://es.made-in-china.com/co_onlyherb/product_Dry-Natural-Tuber-Onion-Seed-Leek-Seedad-Dried-Green-Chinese-Chive-Seed_uooiigiosg.html

MongoDB Resources. (n.d.). *¿Qué es la arquitectura de IoT? | MongoDB | MongoDB*. Retrieved December 20, 2024, from
<https://www.mongodb.com/resources/basics/cloud-explained/iot-architecture>

Nanoparuro. (n.d.). *ESP32-WROOM Placa de Desarrollo ESP32 WROOM32 Modulo Bluetooth | Nanoparuro*. Retrieved December 18, 2024, from
<https://nanoparuro.com/shop/esp32-wroom-placa-de-desarrollo-esp32-wroom32-modulo-bluetooth-805>

Naranjo Andrade, J. R., & Zambrano Navarrete, S. S. (2022). *Implementación de un sistema de riego por goteo con IoT para invernadero de pimiento en la finca Pozo*.
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/ZAMBRANO%20NAVARRETE%20SONIA%20SOFIA.pdf>

Naylamp Mechatronics. (n.d.). *Válvula solenoide 1/2" 12VDC (NC)*. Retrieved July 8, 2025, from <https://naylampmechatronics.com/valvulas/314-valvula-solenoide-1p2-pulg-12vdc-nc.html>

Oliva Cruz, S. M., Maicelo Quintana, J. L., Torres Guzmán, C., & Bardales Escalante, W. (2017). *Propiedades fisicoquímicas del suelo en diferentes estadios de la agricultura migratoria en el Área de Conservación Privada "PalmerasdeOcol", distrito de Molinopampa, provincia de Chachapoyas (departamento de Amazonas)*.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.3828083>

Pachafresco. (20205). *Cebolla china | Pachafresco*.
<https://www.pachafresco.com/product-page/cebolla-china>

Pérez Panduro, S. A. (2021). *Influencia de dosis de fertilizante orgánico foliar, en el rendimiento del cultivo de cebolla china (Allium fistulosum)*

variedad Roja chiclayana, en Lamas.
<https://tesis.unsm.edu.pe/bitstream/11458/5119/1/TESIS-%20Segunda%20Ayola%20P%C3%A9rez%20Panduro.pdf>

Planta Greenhouses. (n.d.). *Commercial Greenhouses*. Retrieved November 27, 2024, from <https://plantagreenhouses.com/collections/commercial-greenhouses>

Plata Londoño, E. A. (2023). *Invernadero autónomo programable para el control de producción de plantas en el laboratorio de agronomía de la Universidad de La Salle del Bajío*.
<https://hdl.handle.net/20.500.12558/4880>

Poblete Manzano, Ó. F. (2023). *Diseño e implementación de un sistema tecnológico para invernaderos en la comunidad José Painecura Hueñalihuen*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/197528>

Policultivo. (n.d.). *Invernadero de Madera - Policultivo | Agricultura Orgánica*. Retrieved January 1, 2025, from <https://policultivo.cl/invernaderos/invernadero-de-madera/>

SENAMHI. (2025a). *SENAMHI Amazonas - Condiciones Climáticas*. 2025.
<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=amazonas&p=condiciones-climaticas>

SENAMHI. (2025b). *SENAMHI Amazonas - Pronóstico Detalle*.
<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=amazonas&p=pronostico-detalle>

Serrano Cermeño, Z. (2005). *Construcción de Invernaderos* (Mundi-Prensa, Ed.; 3.a Edición).

Shi, X., An, X., Zhao, Q., Liu, H., Xia, L., Sun, X., & Guo, Y. (2019). State-of-the-Art Internet of Things in Protected Agriculture. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(8). <https://doi.org/10.3390/S19081833>

- Tapia Fernandez, E., Sastoque Pinilla, L., & López Novoa, U. (2024, September 20). *Digital y seguro, nuevas ideas en la digitalización de plantas*.
<https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/572842-Digital-y-seguro-nuevas-ideas-en-la-digitalizacion-de-plantas.html>
- Texas Instruments. (1999). *LMx93-N, LM2903-N Low-Power, Low-Offset Voltage, Dual Comparators*. www.ti.com
- von Zabeltitz, C. (2011). *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7>
- Wang, C. (2024). *Intelligent Agricultural Greenhouse Control System Based on Internet of Things and Machine Learning*.
- Zia Ur Rahman, M., Raza, A. H., AlSanad, A. A., Akbar, M. A., Liaquat, R., Riaz, M. T., AlSuwaidan, L., Al-Alshaikh, H. A., & Alsagri, H. S. (2022). Real-time artificial intelligence based health monitoring, diagnosing and environmental control system for COVID-19 patients. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 19(8), 7586–7605.
<https://doi.org/10.3934/MBE.2022357>

CAPÍTULO IX: ANEXOS

Anexo A:

Diagrama de Gantt para la ejecución del proyecto

TAREA	PROGRESO	INICIO	FIN	DÍAS
Análisis y requisitos				
Definir requisitos específicos y parámetros de control del sistema	100%	2-9-24	5-9-24	4
Definir los umbrales de control para la cebolla china	100%	5-9-24	7-9-24	3
Diseño del sistema				
Diseñar la arquitectura del sistema IoT	100%	7-9-24	11-9-24	5
Adquisición de componentes				
Compra de sensores, actuadores, riego e invernadero	100%	12-9-24	17-9-24	6
Montaje de hardware				
Montar el sistema según el diseño del sistema	100%	18-9-24	21-9-24	4
Desarrollo de software				
Configurar IDE VS Code + Platformio	100%	23-9-24	24-9-24	2
Desarrollar el código de control para sensores y actuadores	100%	25-9-24	30-9-24	6
Desarrollar el dashboard en React y Typescript	100%	30-9-24	5-10-24	6
Añadir estilos al dashboard.	100%	6-10-24	7-10-24	2
Pruebas de Integración hardware, software y pruebas				
Realizar pruebas unitarias	100%	3-10-24	8-10-24	6
Realizar prueba integral	100%	9-10-24	13-10-24	5
Montaje del invernadero				

TAREA	PROGRESO	INICIO	FIN	DÍAS
Nivelar el suelo	100%	14-10-24	15-10-24	2
Armar los arcos	100%	14-10-24	16-10-24	
Poner la cubierta	100%	16-10-24	17-10-24	2
Realizar conexión de agua y eléctrica	100%	17-10-24	20-10-24	4
Verificar cobertura Wi-Fi	100%	14-10-24	14-10-24	1
Instalar el sistema IoT en el invernadero (menos el sistema de riego)	100%	14-10-24	14-10-24	1
Cultivar la cebolla china				
Preparar el terreno para la siembra	100%	15-10-24	15-10-24	1
Sembrar la cebolla china	100%	16-10-24	17-10-24	2
distribuir las mangueras para riego	100%	17-10-24	21-10-24	5
Encender el sistema	100%	21-10-24	21-10-24	1
Observación del desarrollo de la cebolla china				
Verificar el funcionamiento de la cebolla china	100%		21-10-24	30-11-24
Cosecha de la cebolla china				
Cosecha de la cebolla china		30-10-24	30-10-24	1
Evaluación de calidad (tamaño y peso)			30-10-24	30-10-24
Venta de la cebolla china		30-10-24	30-10-24	1
Análisis de resultados				
Evaluación económica de la siembra de cebolla china			31-10-24	4-11-24

Anexo B:

Factores más importantes en la producción de Cebolla China

Factor	Descripción
Temperatura	La cebolla china se produce mejor en climas templados, con temperaturas ideales entre 13°C y 24°C., sin embargo, puede soportar temperaturas mayores a 30°C
Humedad del	Necesita suministro constante y moderado de agua entre

suelo	50% a 75%.
Luz	Necesita entre 12 a 16 horas de luz diaria.

Nota. Elaboración propia.

Anexo C:

Requerimientos del Sistema y el Sistema IoT

C.1. Requerimientos funcionales

- El sistema debe medir la temperatura ambiental con precisión de por lo menos 1°C en el rango de 0°C a 50°C.
- El sistema debe medir la humedad del suelo con precisión de por lo menos $\pm 3\%$ en el rango de 0% a 100%.
- El sistema debe medir la intensidad lumínica con un rango mínimo de 0 a 6500 lux.
- El sistema debe activar o desactivar automáticamente los sistemas de ventilación cuando la temperatura exceda o descienda los límites de temperatura configurado.
- El sistema debe activa o desactivar el sistema de riego cuando la humedad exceda o descienda los límites de humedad configurado.
- El sistema debe activar o desactivar la iluminación artificial según la programación horaria y niveles de luz natural.
- El sistema debe proporcionar una interfaz web para la visualización de en tiempo real.

C.2. Requerimientos No funcionales:

- La implementación del invernadero inteligente debe ser de bajo costo (menor de S/. 1500 soles).

C.3. Requerimientos Técnicos:

- Microcontrolador con Wi-Fi y Bluetooth
- Sensores de temperatura y humedad similares al DHT22 o similares
- Sensores de humedad del suelo capacitivos FC-28 o superiores
- Firmware basado en Arduino o ESP-IDF

- Servidor basado en Node.js
- Protocolo de comunicación HTTP y WebSocket para la transmisión de datos
- Dashboard web implementado con React y Typescript.

C.4. Requerimientos del Invernadero

- Control del sistema de riego
- Control de temperatura
- Control de iluminación
- Medición del agua usada en riego

Anexo D:

Arquitectura del Sistema IoT

D.1. Criterios de elección:

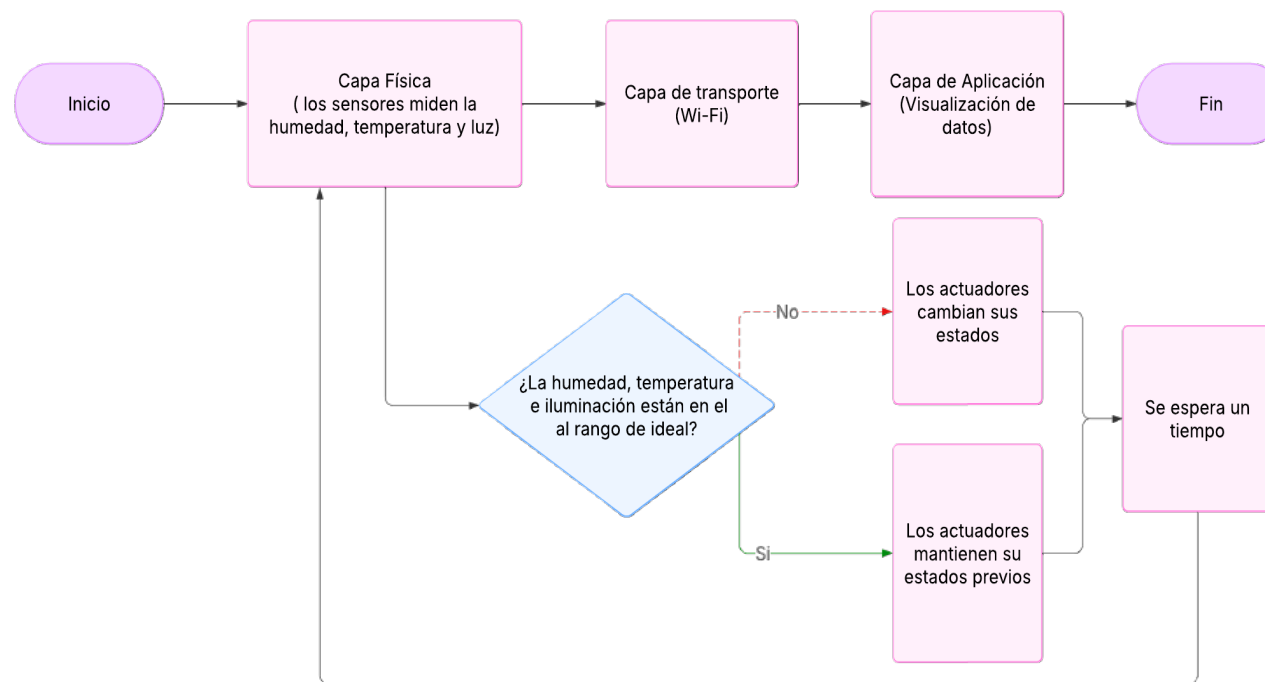
- Fácil de implementación
- Bajo costo

D.2. Características:

- Las decisiones importantes serán tomadas localmente en el borde del sistema IoT, específicamente en el microcontrolador, permitiendo minimizar la latencia en la ejecución de acciones y optimizando el tiempo de respuesta frente a variaciones en los parámetros de riego, temperatura o iluminación.
- Los datos recopilados por el microcontrolador se enviarán a la página web, donde serán almacenados, analizados y visualizados para monitorear el comportamiento de temperatura, humedad e iluminación del invernadero en tiempo real, facilitando la gestión agronómica y la toma de decisiones informadas desde cualquier ubicación con acceso remoto.

En la Figura D1 y Figura D2 se presentan respectivamente el diagrama de flujo del sistema, que detalla la secuencia lógica de los procesos y operaciones necesarios para el monitoreo y control automatizado.

Figura D1
Diagrama de flujo del sistema

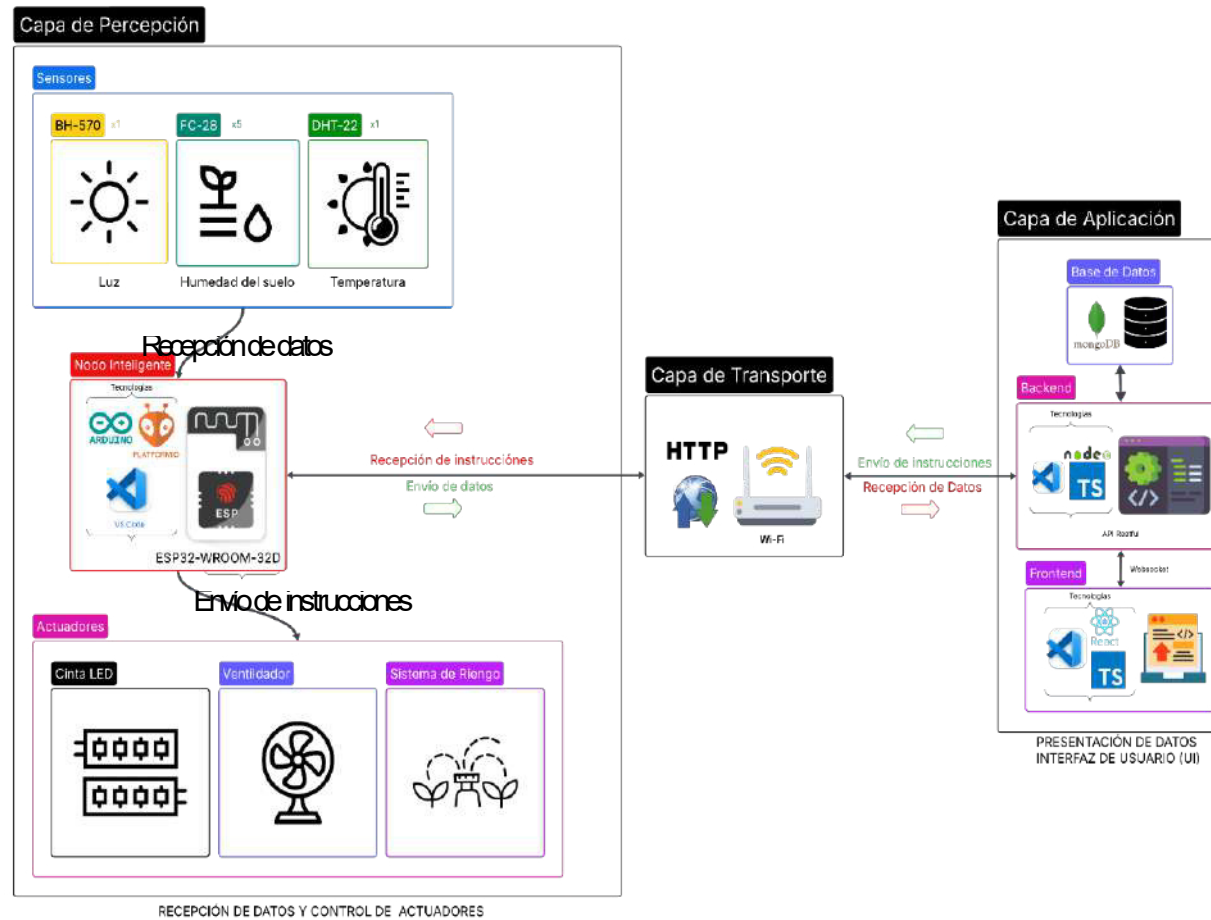


Nota: Elaboración propia

Estas representaciones proporcionan una visión clara y detallada de la interacción entre los procesos automatizados y la infraestructura tecnológica, facilitando el entendimiento tanto del funcionamiento interno como de la escalabilidad y flexibilidad del sistema implementado.

Figura D2

Arquitectura de 3 capas para la implementación del Sistema IoT en el invernadero



Nota: Elaboración propia

Anexo E:

Selección y justificación de componentes

E.1. Criterios generales de elección:

- margen de medida
- precisión
- resolución
- tiempo de respuesta
- precio y disponibilidad local

E.2. Sensores

E.2.1. Sensores de Temperatura y Humedad Relativa

A continuación, en la Tabla E1 se comparan sensores de temperatura y humedad relativa.

Tabla E1

Comparación de características técnicas de sensores de temperatura y humedad relativa

Características	DHT11	DHT22	BME280
Rango de temperatura (°C)	0 a 50	-40 a 80	-40 a 85
Precisión de temperatura	±2°C	±0.5 °C	±1 °C
Resolución de temperatura	1 °C	0.1 °C	0.01 °C
Rango de humedad relativa (%)	20 a 80	0 a 100	0 a 100
Precisión de humedad relativa	±5%	±5%	±3%
Resolución de humedad relativa	1%	0.10%	0.01%
Sensor de presión	No	No	Sí
Interfaz de comunicación	Digital	Digital	I2C / SPI
Voltaje de operación	3.3 a 5V	3.3 a 6V	1.8 a 3.6V
Consumo de energía	Bajo	Bajo	Muy bajo
Tiempo de respuesta	~1Hz	~0.5-2Hz	Hasta 100Hz
Costo	Muy bajo	Bajo	Moderado

Nota. Datos obtenidos de la documentación de los sensores

Justificación. Se ha escogido el sensor DHT22, el cual tiene una precisión

de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y 0.1°C de resolución para la medición de temperatura, así como una precisión de $\pm 1\%$ y resolución de 1% para la medición de la humedad relativa (para más detalles, ver Anexo P). además de sus características técnicas adecuadas, el precio del sensor es accesible lo convierte en una opción eficiente y viable dentro del presupuesto previsto

E.2.2. Sensores de Humedad del Suelo

A continuación, en la Tabla E2 se comparan sensores de humedad del suelo

Tabla E2

Comparación de características técnicas de sensores de humedad del suelo

Característica	Sensor Capacitivo V1.2	Sensor Resistivo FC-28
Tipo de sensor	Capacitivo	Resistivo
Precisión estimada	$\pm 3\%$	Menor precisión (variable)
Resistencia a la corrosión	Alta (recubrimiento protector)	Baja (los electrodos se corroen con el tiempo)
Durabilidad	Alta	Baja a media (vida útil limitada)
Interferencia por sales del suelo	Menor interferencia	Alta interferencia (afecta la lectura)
Estabilidad de lectura	Buena	Menos estable (más ruido eléctrico)
Costo	Accesible (ligeramente más caro que FC-28)	Muy económico
Facilidad de calibración	Requiere calibración manual	Requiere calibración manual
Recomendado para uso prolongado	Sí	No
Interfaz de salida	Analógica	Analógica y digital (según configuración)

Nota: Datos extraído de la documentación de los sensores

Justificación. Se ha seleccionado el sensor de humedad del suelo resistivo FC-28, debido a que presenta un costo muy económico y su vida útil fue suficiente para los fines del presente proyecto. A pesar de sus limitaciones en cuanto a durabilidad y susceptibilidad a la corrosión, este sensor resultó adecuado para pruebas a corto plazo y validación funcional del sistema automatizado de riego.

E.2.2. Sensores de Luz

A continuación, en la Tabla E3 se comparan sensores de luz

Tabla E3

Comparación de características técnicas de sensores de luz

Característica	BH1750	TSL2561	MAX44009
Rango	1-65535 lux	0.1-40K lux	0.045-188K lux
Precisión	±20%	±15%	±15%
Resolución	16 bits	16 bits	16 bits
Interfaz	I2C	I2C	I2C
Voltaje	3.3-5V	3.3-5V	1.8-3.3V
Espectro	Visible	IR+Visible	Visible
Precio (S/.)	S/.15-S/.25	S/ 30 - S/ 45	S/ 38 - S/ 57

Nota. Elaboración propia con los datos obtenidos de las cotizaciones realizadas durante el desarrollo del proyecto.

Justificación. Se ha elegido el sensor BH1750 para la medición de intensidad lumínica. Si bien no es el más preciso entre los evaluados en la Tabla E4, su margen de error del 20 % es suficiente para los requerimientos del presente proyecto. Este sensor digital proporciona lecturas en lux y utiliza el protocolo de comunicación I2C, lo que facilita su conexión al microcontrolador y simplifica la implementación del sistema (para más detalles técnicos, ver Anexo D). Además, su precio accesible lo convierte en una opción eficiente y adecuada para el presupuesto previsto.

E.3. Actuadores

E.3.1. Válvulas solenoides

A continuación, en la Tabla E4 se comparan sensores de válvula solenoides.

Tabla E4

Comparación de características técnicas de válvulas selenoide de 1/2"

Conexión	1/2" (DN15)	1/2"	1/2"
Rango de presión	0-10 bar	0-8 bar	0-8 bar
Material de la válvula	Latón/Stainless Steel	Plástico/Acero Inoxidable	Plástico

Conexión	1/2" (DN15)	1/2"	1/2"
Rango de temperatura	-5°C a 80°C	-10°C a 60°C	0°C a 70°C
Tamaño nominal	DN15 (1/2")	1/2"	1/2"
Voltaje	12V DC	12V DC	12V DC
Características adicionales	Válvula de 2 vías, adecuada para aplicaciones de riego.	Válvula de 2 vías, fácil de instalar, de bajo costo.	Válvula de flujo de agua, opción económica y duradera.

Nota. Elaboración Propia

Justificación. Se ha elegido la válvula solenoide de 12 V G1/2 DN15, debido a sus características técnicas, como el voltaje de alimentación y la presión máxima soportada (para más detalles, ver **Anexo R**), las cuales se ajustan adecuadamente a los requerimientos del sistema de riego automatizado del proyecto. Además, su precio accesible la convierte en una opción eficiente y viable dentro del presupuesto previsto.

E.3.2. Ventiladores

A continuación, en la Tabla E5 se comparan ventiladores.

Tabla E5

Tabla comparativa de ventiladores disponibles en la localidad

Características	Ventilador Axial Bossko 18"	Extractor Axial Volker 16"	Ventilador Alfano 26"
Potencia	200 watts	±194 Watts (motor 1/8 HP)	285 watts
Flujo de aire	5,100 - 8,500 m³/h	3600 m³/h	5,100 - 8,500 m³/h
Montaje	Piso, pared, mesa	Pared	Muro
Precio	S/.60.00	S/. 499.90	S/. 689.90

Nota. Elaboración propia con los datos obtenidos de las cotizaciones realizadas durante el desarrollo del proyecto.

Justificación. Se ha seleccionado el ventilador Bossko BK-8219VI debido a que es la opción más económica entre las evaluadas y cumple con los requerimientos de flujo de aire necesarios para la ventilación del invernadero. Su rendimiento ha sido considerado adecuado para mantener la temperatura dentro del rango.

E.3.3. Cinta LED

A continuación, en la Tabla E6 se comparan cintas LED.

Tabla E6

Tabla comparativa de cintas LED disponibles en Perú

Características	Fitolampy	UrbanGarden LED	Sanlex Agro LED
Espectro de luz	Espectro rojo-azul	Espectro rojo-azul	Espectro rojo-azul, limitado en longitudes intermedias
Eficiencia	2.5 $\mu\text{mol/J}$, 18W/m	1.9 $\mu\text{mol/J}$, 22W/m	2.0 $\mu\text{mol/J}$, 20W/m
Longitud	5m	5m	5m
Costo	S/. 60	S/. 50	S/. 75

Nota. Elaboración propia con los datos obtenidos de las cotizaciones realizadas durante el desarrollo del proyecto.

Justificación. Para el sistema de iluminación se ha seleccionado la cinta de luz LED Fitolampy, ya que ofrece un espectro combinado de luz roja y azul, lo cual permite generar un ambiente óptimo para el crecimiento de las plantas. La luz azul estimula el desarrollo vegetativo, mientras que la luz roja favorece la floración. Además, su precio accesible la convierte en una opción eficiente y viable dentro del presupuesto establecido para el proyecto, cumpliendo con los requerimientos técnicos sin comprometer la sostenibilidad económica del sistema.

E.3.3. Microcontroladores

A continuación, en la Tabla E7 se comparan microcontroladores.

Tabla E7

Tabla comparativa de microcontroladores con conexión Wi-Fi integrado

Característica	Arduino MKR WIFI 1010	Arduino Nano 33 IoT	ESP32-WROOM-32
Microcontrolador	SAMD21 Cortes-M0+ 32bits	SAMD21 Cortes-M0+ 32bits	ESP32 (Xtensa dual-core 32 bits)
Conectividad	Wi-Fi (ESP32 integrado), Bluetooth BLE	Wi-Fi y Bluetooth BLE (u-blox NINA-W102 basado en ESP32)	Wi-Fi, Bluetooth 4.2 (BLE + BR/EDR)
Velocidad de reloj	48 MHz	48 MHz	Hasta 240 MHz
Memoria flash	256 KB	256 KB	4 MB
RAM	32 KB	32KB	520 KB SRAM
GPIOs disponibles	22 pines	14pines	34 pines
Voltaje de operación	3.3V	3.3V	3.3V
Interfaz de comunicación	UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C, I2S, CAN, Ethernet MAC
Consumo energético	Bajo	Muy Bajo	Bajo a moderado
Precio	S/. 135.00	S/. 99.00	S/. 35.00

Nota. Elaboración propia con los datos obtenido de las cotizaciones realizadas durante el desarrollo del proyecto.

Justificación. Se ha seleccionado el microcontrolador ESP32-WROOM-32 debido a que ofrece una mayor capacidad de procesamiento, más memoria, una mayor cantidad de pines disponibles y un precio accesible en comparación con otras alternativas. Estas características lo convierten en una opción ideal para el fin del proyecto.

E.4. Sistema de riego

E.4.1. Goteros

A continuación, en la Tabla D8 se comparan goteros.

Tabla E8*Tabla comparativa de goteros disponibles en la localidad*

Característica	Gotero autocompensante	Gotero Regulable	Cinta de Goteo Nefim
Caudal	1L/h	0-70 L/h	2L/h
Tipo	Autocompensante	Regulable	Cinta de goteo
Longitud	-	-	3000m
Precio (S/.)	10.00	0.25	680.00

Nota. Elaboración propia

Justificación. Se ha seleccionado el gotero autocompensante, ya que permite garantizar un riego uniforme, independientemente de la presión del agua o la longitud de la manguera de riego. Esta característica es especialmente importante en invernaderos, donde se busca una distribución homogénea del agua para optimizar el crecimiento y desarrollo del cultivo de cebolla china.

E.4.2. Mangueras

A continuación, en la Tabla E8 se comparan goteros.

Tabla E9*Tabla comparativa de mangueras de jardín disponibles en la localidad*

Manguera	Material	Longitud	Precio (S/.)
Manguera de riego de jardín se 1/8" para riego por goteo	PVC	40m	35.00
Manguera de riego de jardín se 1/8" para riego por goteo	Goma flexible	40m	70.00

Nota. Elaboración propia

Justificación. Se ha seleccionado la manguera de 1/8" de material PVC, ya que representa la opción más económica entre las evaluadas. A pesar de su bajo costo, cumple con los requisitos funcionales del sistema de riego por goteo. Cabe resaltar que este tipo de manguera es adecuado para invernaderos de pequeña escala, como el desarrollado en este proyecto. Sin embargo, en aplicaciones a mayor escala, se recomienda el uso de cintas de

riego por goteo, las cuales ofrecen una distribución más uniforme del agua, mejor adaptabilidad al terreno y mayor eficiencia en sistemas de producción extensivos.

Anexo F:

Elección y justificación del Tipo de control

A continuación, en la tabla F1 se compara tipos de control

Tabla F1

Comparación de tipos de control

Tipo de Control	Ventajas	Desventajas
Control On/Off (Histéresis)	Simple y fácil de implementar, bajo costo, adecuado para procesos sin requisitos precisos.	Respuesta abrupta, puede causar fluctuaciones en las condiciones, no ideal para sistemas sensibles.
Control PID (Proporcional-Integral-Derivativo)	Control preciso y estable, menos oscilaciones en las variables, ideal para sistemas que requieren ajustes finos.	Más complejo y costoso, requiere calibración precisa de los parámetros (P, I, D).
Control Fuzzy (Difuso)	Capaz de manejar incertidumbre, no requiere modelos matemáticos exactos.	Complejo de implementar, puede ser difícil de afinar y calibrar.
Control en Cascada	Mayor estabilidad y control preciso, ideal para sistemas con múltiples variables de control.	Más complejo de implementar, requiere mayor infraestructura de control.

Nota. Elaboración propia

Justificación. El proyecto no requiere un control de alta precisión, ya que el cultivo de cebolla china se adapta adecuadamente dentro de un rango aceptable de temperatura y humedad. Por esta razón, el control por histéresis resulta suficiente y adecuado.

Anexo G:

Elección y justificación de tecnología y protocolo para la capa de comunicación

G.1. Tecnología

G1.1. Criterios para para la elección de tecnología de comunicación:

- Alcance
- Costo
- accesibilidad de la tecnología en la localidad.

En la Tabla G1 se comparan las tecnologías comúnmente utilizadas en invernaderos destacando el alcance, el costo y la accesibilidad.

Tabla G1

Comparación de tipo de protocolo de comunicación a usar

Tecnología	Alcance	Consumo	Velocidad	Costo	Accesibilidad
Wi-Fi	50-100m	Medio-alto	Alta	Bajo	Sí
LoRaWAN	Hasta 15km	Muy Bajo	Bajo	Alta	No
Zigbee	10-100m	Bajo	Bajo	Alta	No
NB-IoT	Hasta 10km	Bajo	Medio	Alta	No

Nota. Elaboración propia

Justificación. Para el presente proyecto, se ha optado por la tecnología Wi-Fi, debido a su bajo costo, amplia disponibilidad en la zona, facilidad de instalación y un alcance que resulta más que suficiente para las dimensiones del invernadero implementado.

G2. Protocolo

G2.1. Criterio

- Latencia
- facilidad de implementación y escalabilidad

En la Tabla G2 se comparan los protocolos comúnmente utilizados en invernaderos.

Tabla G2

Comparación de tipo de protocolo de comunicación a usar

ítem	HTTP	MQTT	WebSocket
Tipo de comunicación	Solicitud/Respuesta (cliente-servidor)	Publicar/Suscribir (broker-cliente)	Conexión bidireccional (cliente-servidor)
Latencia	Mayor latencia debido al ciclo de solicitud/respuesta	Baja latencia con conexión persistente	Latencia baja, permite comunicación

ítem	HTTP	MQTT	WebSocket
			continua
Tipo de conexión	Conexiones de corta duración (el cliente solicita los datos)	Conexiones persistentes y de larga duración entre el broker y los clientes	Conexión persistente entre el cliente y el servidor
Complejidad del protocolo	Baja complejidad	Más complejo, necesita un broker	Baja complejidad, fácil de implementar
Escalabilidad	Menos escalable en comparación con MQTT, pero suficiente para proyectos pequeños	Altamente escalable, ideal para grandes cantidades de dispositivos	Escalable, pero menos eficiente que MQTT para IoT masivo
Facilidad de implementación	Fácil de implementar, ampliamente soportado	Más complejo de implementar, requiere un broker MQTT	Fácil de implementar con bibliotecas web modernas
Requerimientos de infraestructura	Sencillo, solo requiere servidor-cliente y navegador web	Requiere un broker para gestionar los mensajes	Requiere un servidor WebSocket para gestionar la conexión
Comunicación en tiempo real	Puede usarse para tiempo real, pero menos eficiente que MQTT	Muy eficiente para comunicación en tiempo real con baja latencia	Muy eficiente para comunicación en tiempo real bidireccional
Eficiencia en la transferencia de datos	Puede ser ineficiente para actualizaciones frecuentes, no ideal para intercambio de datos continuo	Eficiente para actualizaciones frecuentes, baja sobrecarga	Eficiente para actualizaciones continuas sin sobrecarga significativa
Adecuación para el caso de uso	Dashboards web y actualizaciones poco frecuentes	Sistemas IoT, dispositivos con comunicación frecuente	Ideal para aplicaciones web en tiempo real, como dashboards

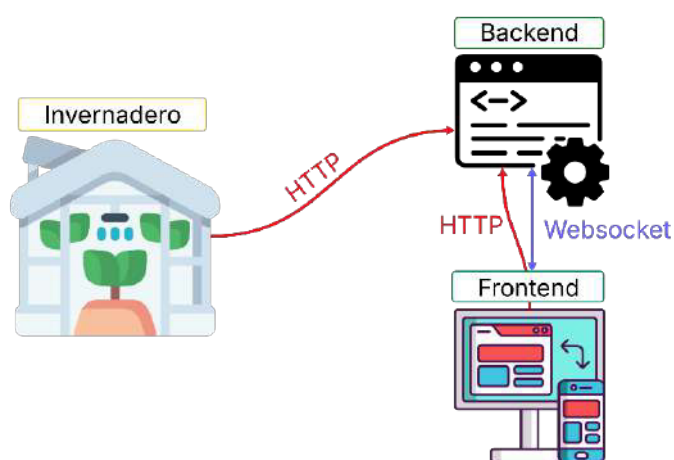
Nota. Adaptación de las documentaciones HTTP, MQTT y WebSocket

Justificación. El protocolo MQTT sería la opción ideal debido a su baja latencia y su capacidad para manejar comunicaciones constantes y eficientes, características ideales para proyectos IoT con dispositivos que requieren

actualizaciones frecuentes. Sin embargo, se optó por utilizar el protocolo HTTP y WebSocket como se muestra en la Figura F3. HTTP para la interacción entre el microcontrolador y el backend, principalmente por su facilidad de implementación y bajos requerimientos de infraestructura. Dado que el sistema es relativamente pequeño y consta de un número limitado de sensores y actuadores en un invernadero de 25m².

Figura G3

Protocolos de comunicación a utilizar en el proyecto



Nota: Elaboración propia

Anexo H:

Algoritmos y código

H.1. Control de Humedad del Suelo:

De acuerdo con el

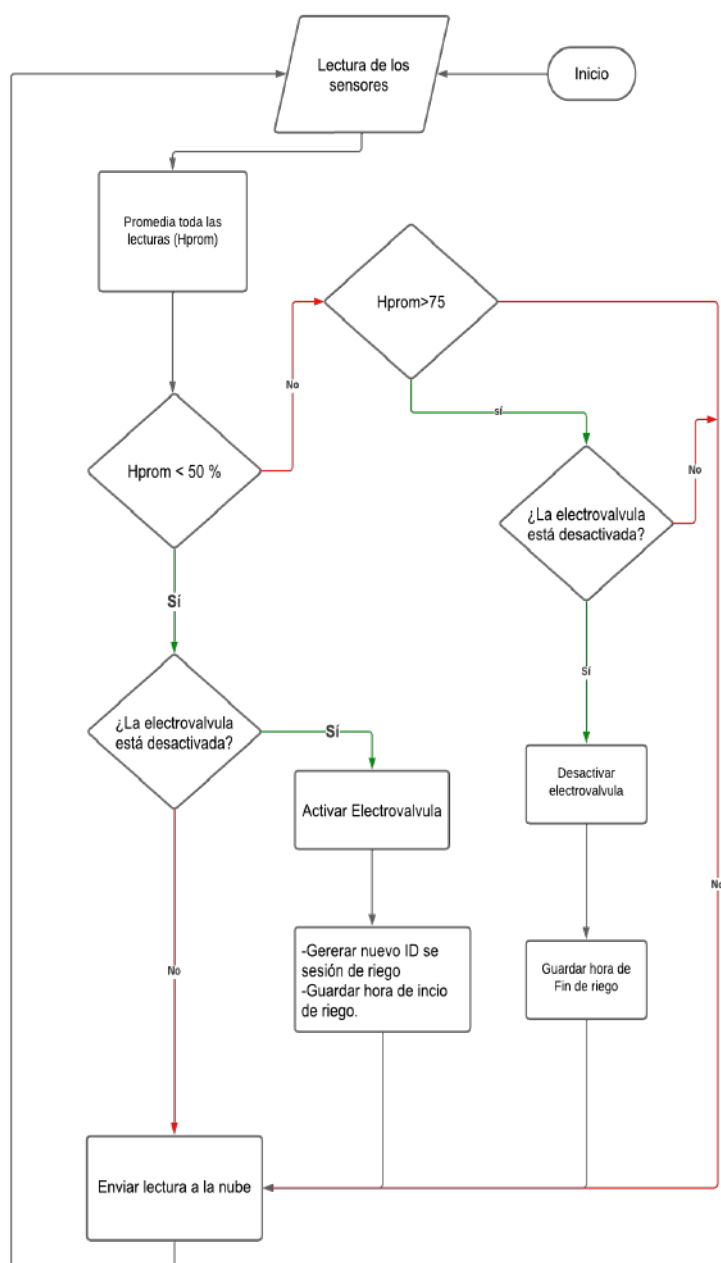
Anexo **B** el rango óptimo de humedad del suelo para el desarrollo adecuado de la cebolla china se encuentra entre el 50% a 75%. Por lo tanto, la lógica de control debe ser capaz de generar un ciclo por histéresis para mantener el rango de humedad del suelo dentro del rango requerido.

En la Figura H1 se presenta el diagrama de flujo de la lógica de control de la humedad del suelo, y en la Figura H2 se muestra un fragmento principal de la implementación de la lógica de control correspondiente.

El funcionamiento del ciclo por histéresis es el siguiente: cuando el sistema de riego está encendido, se detecta que la humedad está en incremento, por lo que el riego se mantendrá activado hasta alcanzar umbral superior del 75%. En cambio, una vez que el sistema de riego se apaga, se detecta que la humedad del suelo está en decremento; en ese caso, el sistema de riego se mantendrá apagado hasta alcanzar el umbral inferior del 50%.

Figura H1

Diagrama de Flujo de control de humedad del suelo



Nota: Elaboración propia

Figura H2

Fragmento de la lógica de control de humedad del suelo

```

1 void controlarHumedad() {
2
3   Float humedadSuelo = leerHumedadPromedio(); // Leer la humedad del suelo
4
5   Serial.print("Humedad del suelo: ");
6   Serial.println(humedadSuelo);
7
8
9   if (humedadSuelo < HUMEDAD_BAJA && !riegoActivo) {
10
11     digitalWrite(PIN_RELAY_RIEGO, LOW); // Se enciende el riego
12
13     riegoStartTime = getFormattedTime(); // Se registra la fecha de inicio de riego 2024-04-11 12:16:35
14     riegoActivo = true; // Flag para indicar que el riego está activo
15     riegoEndTime = "";
16     riegoId = generarIdUnico(); // Generar un nuevo ID
17     consumoRiego = 0.0; // Reiniciar el consumo de agua
18
19   } else if (humedadSuelo > HUMEDAD_ALTA && riegoActivo) {
20     digitalWrite(PIN_RELAY_RIEGO, HIGH); // Se apaga el riego
21
22     riegoEndTime = getFormattedTime(); // Se registra la fecha de fin de riego 2024-04-11 12:10:35
23     riegoActivo = false; // Flag para indicar que el riego está apagado
24
25   }
26
27   // Si no entra a ninguna de las condiciones, significa que la humedad está en el rango deseado
28   // y no se hace nada. El riego se mantiene apagado o encendido según la última acción.
29 }

```

Nota: Elaboración propia

H.2. Control de Temperatura:

De acuerdo con el

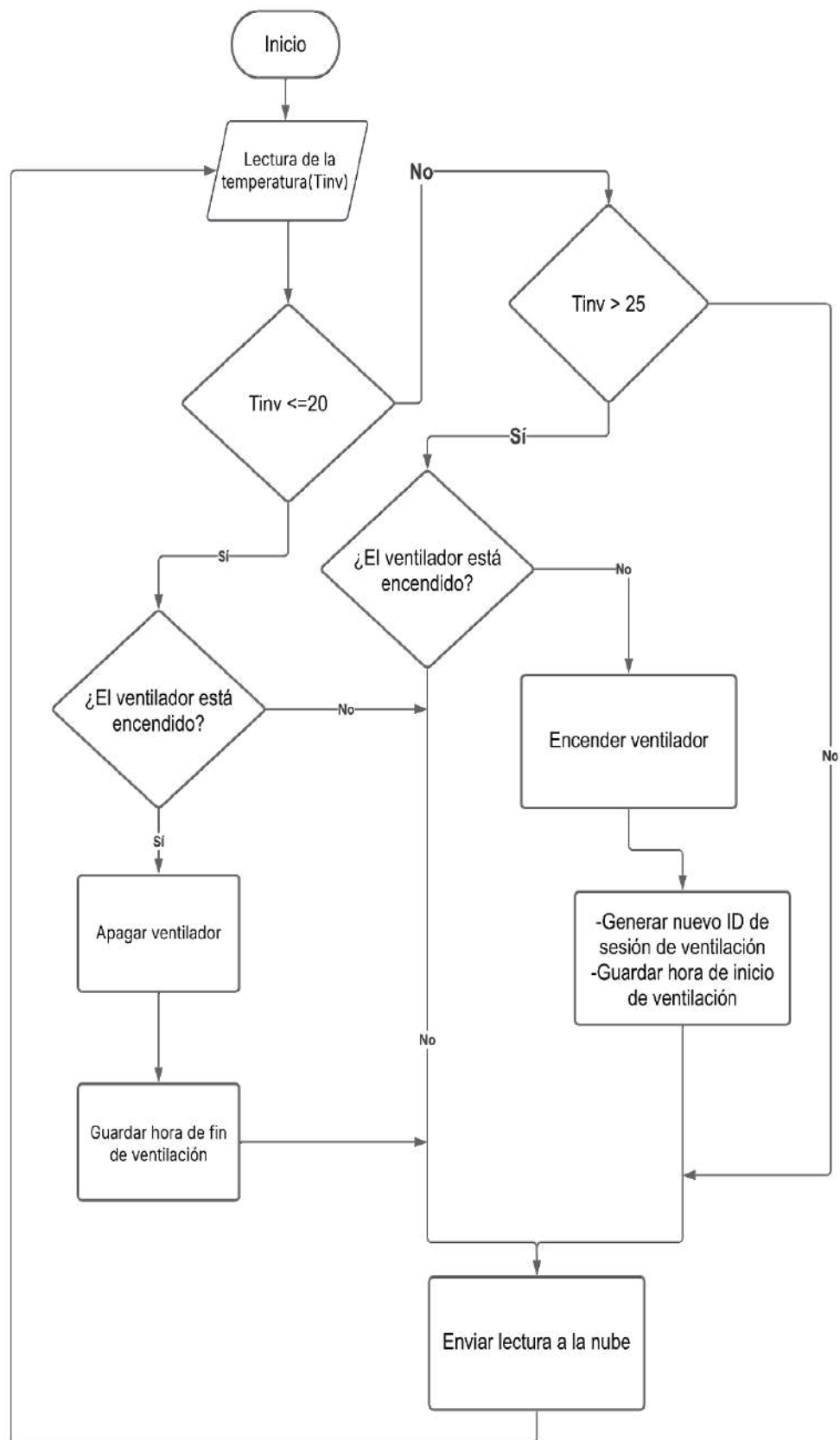
Anexo B, el rango óptimo de temperatura para el desarrollo adecuado de la cebolla china es de 15°C a 25°C. Por lo tanto, el sistema de control debe ser capaz de mantener la temperatura dentro del rango requerido.

La Figura H3 se presenta el diagrama de flujo que muestra la lógica de control de la temperatura. La Figura H4 presenta un fragmento principal del código de la implementación de la lógica de control correspondiente.

Cuando la temperatura va en incremento dentro del invernadero, el sistema permite que continúe hasta alcanzar el umbral superior de 25°C; entonces, se activa el ventilador, el cual se mantiene encendido hasta que la temperatura alcance el umbral inferior de 15°C.

Figura H3

Diagrama de flujo para el control de temperatura del invernadero



Nota: Elaboración propia.

Figura H4

Fragmento de código del control de temperatura del invernadero

```

1 void controlarTemperatura()
2 {
3     temperatura = dht.readTemperature(); // Leer temperatura
4     humedadRelativa = dht.readHumidity(); // Leer humedad relativa
5
6     if (temperatura > TEMPERATURA_MAX && !ventiladorActivo)
7     {
8         digitalWrite(PIN_RELAY_VENTILADOR, LOW); // Se enciende el ventilador
9
10        ventiladorStartTime = getFormattedTime(); // Se guarda la fecha y hora del inicio de la ventilación
11        ventiladorActivo = true; // Flag para indicar que el ventilador está activo
12        ventiladorEndTime = "";
13        ventiladorId = generarIdUnico(); // Generar un nuevo ID al inicio
14    }
15    else if (temperatura ≤ TEMPERATURA_MAX && ventiladorActivo)
16    {
17        digitalWrite(PIN_RELAY_VENTILADOR, HIGH); // Se apaga el ventilador
18
19        ventiladorEndTime = getFormattedTime(); // Se guarda la fecha y hora del fin de la ventilación
20        ventiladorActivo = false; // Flag para indicar que el ventilador está apagado
21    }
22
23    // Si no entra a ninguna de las condiciones, significa que la temperatura está en el rango deseado
24    // y no se hace nada. El ventilador se mantiene apagado o encendido según la última acción.
25 }

```

Nota: Elaboración propia

H.3. Control de Iluminación:

De acuerdo con el

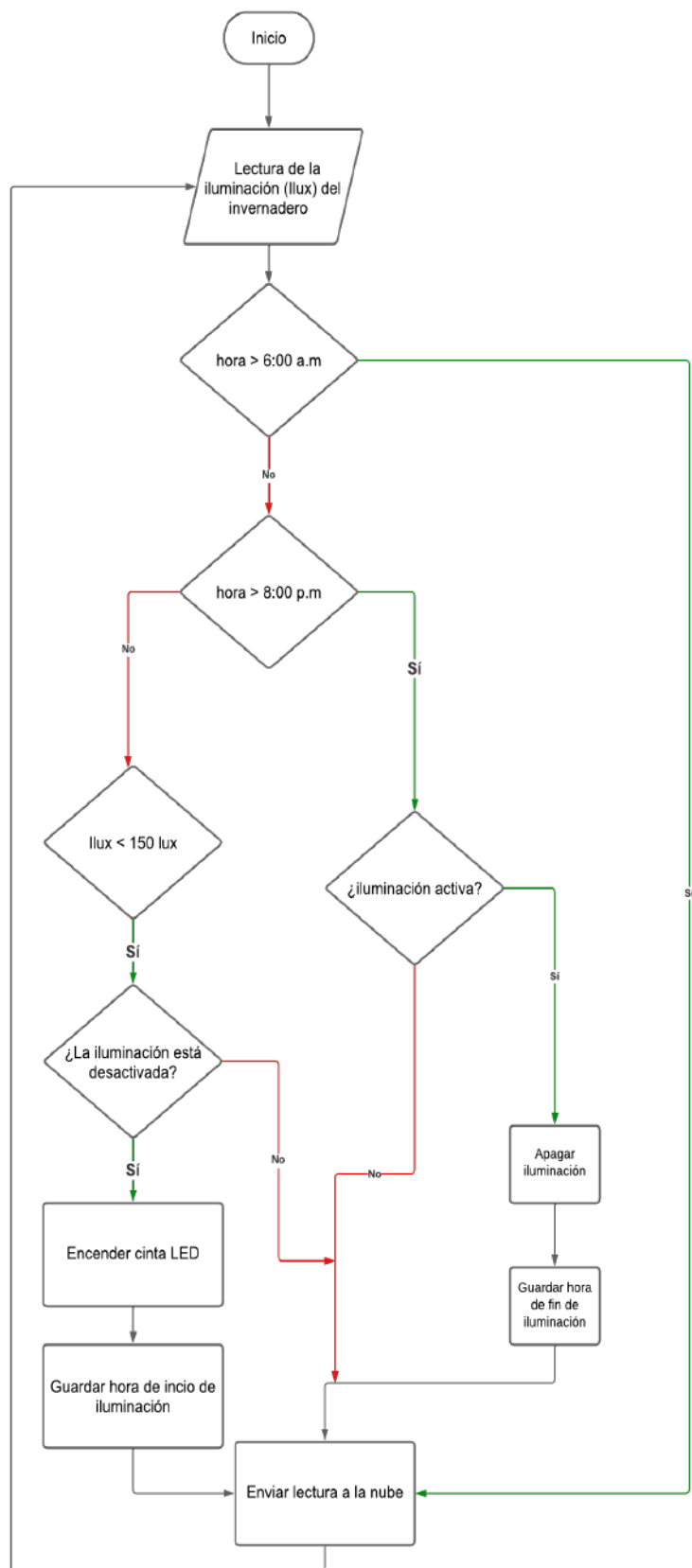
Anexo **B**, la cebolla china requiere entre de 14 a 16 horas de iluminación diaria para un desarrollo óptimo. La Figura presenta el diagrama de flujo de la lógica de control para el sistema de iluminación, mientras la Figura H6 presenta un fragmento de código principal de la implementación de la lógica.

Se considera las condiciones lumínicas de la localidad de Taquia, donde la luz natural está disponible aproximadamente entre las 6:00 a.m. y las 6 p.m., es decir 12 horas continuas.

El sistema se activará en el rango de las 6:00 a.m. y la 8 p.m.

Figura H5

Diagrama de Flujo para el control de la iluminación del invernadero



Nota: Elaboración propia

Figura H6

Fragmento de código para el control del sistema de iluminación.

```

1 void controlarIluminacion()
2 {
3     luz = lightMeter.readLightLevel();
4
5     // Actualizar y obtener la hora actual
6     timeClient.update();
7     int horaActual = timeClient.getHours();
8
9     if (luz < LUZ_MIN && horaActual ≥ 6 && horaActual < 20 && !luzActiva)
10    {
11        digitalWrite(PIN_RELAY_LUZ, LOW); // Se enciende la luz
12
13        luzStartTime = getFormattedTime(); // Se guarda la fecha y hora del inicio de la iluminación
14        luzActiva = true; // Flag para indicar que la luz está activa
15        luzEndTime = "";
16        luzId = generarIdUnico(); // Generar un nuevo ID al inicio
17    }
18    else if ((luz ≥ LUZ_MIN || horaActual < 6 || horaActual ≥ 20) && luzActiva)
19    {
20        digitalWrite(PIN_RELAY_LUZ, HIGH); // Se apaga la luz
21
22        luzEndTime = getFormattedTime(); // Se guarda la fecha y hora del fin de la iluminación
23        luzActiva = false; // Flag para indicar que la luz está apagada
24    }
25
26    // Si no entra a ninguna de las condiciones, significa que la luz está en el rango deseado
27    // y no se hace nada. La luz se mantiene apagada o encendida según la última acción.
28 }

```

Nota: Elaboración propia

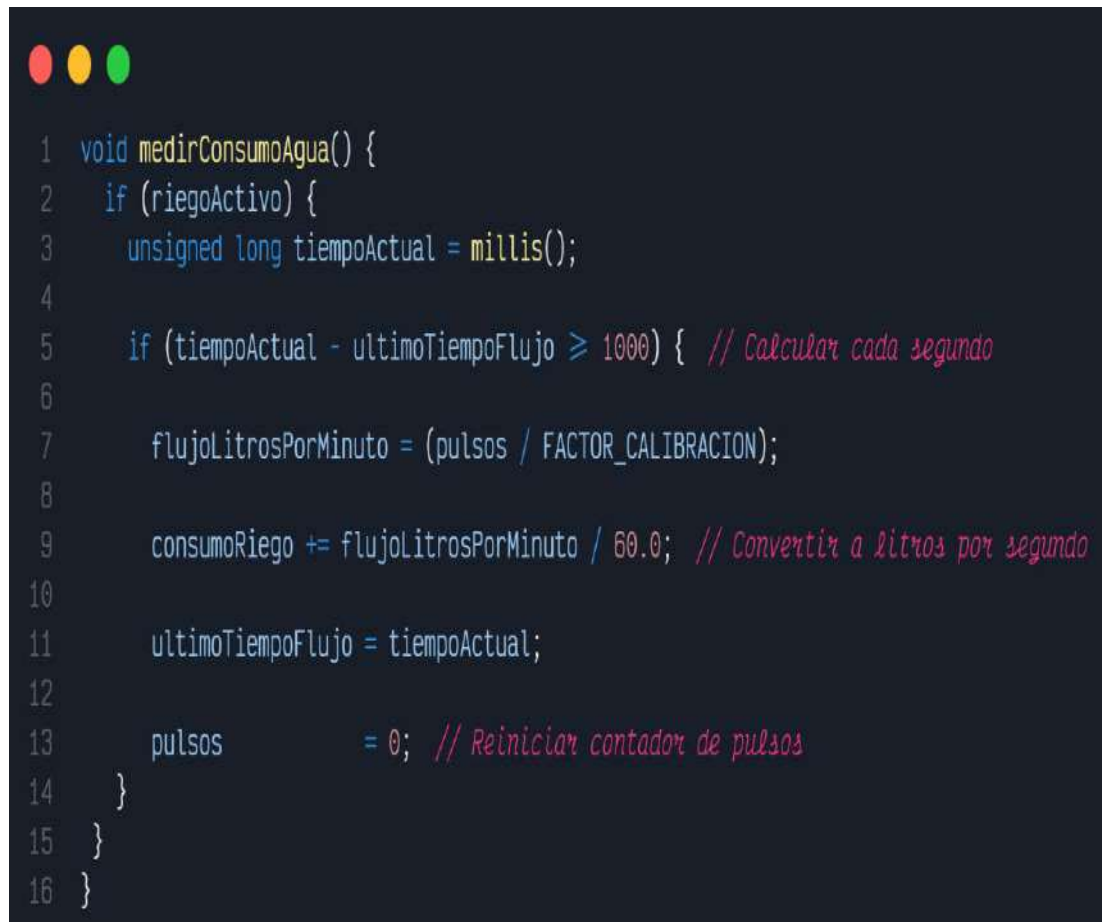
H.4. Medición del Consumo de Agua

Para cuantificar los litros de agua utilizados en el riego, se utiliza el sensor de flujo de agua YF-S201 ½", el cual permite medir en tiempo real el volumen de agua que está pasando por el sistema de riego. La Figura H7 presenta un

fragmento principal de código que realiza la medición, activándose únicamente cuando el riego está activo.

Figura H7

Fragmento de código para la medición del consumo de agua



```

1 void medirConsumoAgua() {
2     if (riegoActivo) {
3         unsigned long tiempoActual = millis();
4
5         if (tiempoActual - ultimoTiempoFlujo ≥ 1000) { // Calcular cada segundo
6
7             flujolitrosPorMinuto = (pulsos / FACTOR_CALIBRACION);
8
9             consumoRiego += flujolitrosPorMinuto / 60.0; // Convertir a litros por segundo
10
11             ultimoTiempoFlujo = tiempoActual;
12
13             pulsos = 0; // Reiniciar contador de pulsos
14         }
15     }
16 }

```

Nota: Elaboración propia

H.5. Envío de datos al backend

Además de ejecutar acciones sobre los actuadores, el sistema debe enviar los datos en formato JSON a la capa de aplicación para que se pueda ver en el dashboard los datos en tiempo real. El formato del JSON está estructurado tal como se muestra en la Figura H8, en la llave que corresponde a los actuad puede enviarse un objeto vacío, todo depende de acuerdo con qué actuador se activa. Cuando un actuador se activa se genera un ID de sesión (riego_id, iluminación_id y ventilación_id), el cual permite hacerle seguimiento a la sesión en específico hasta que se inactive.

Por ejemplo, si solo está activo el sistema de riego, solo se incluirá los datos

correspondientes al riego.

En el Anexo T se muestra el fragmento de código correspondiente al envío de datos al backend.

Figura H8

Estructura JSON que envía el Esp32 a la capa de aplicación

```

1  {
2    "sensores": {
3      "humedad": 22,
4      "temperatura": 54,
5      "luz": 596,
6      "humedad_suelo_1": 548,
7      "humedad_suelo_2": 548,
8      "humedad_suelo_3": 548,
9      "humedad_suelo_4": 548,
10     "humedad_suelo_5": 548,
11     "status_luz": "on",
12     "status_riego": "on",
13     "status_ventilador": "on"
14   },
15   "actuadores": {
16     "riego": {
17       "estado": "on",
18       "riego_id": 123564,
19       "riego_start_time": "2024-10-16 4:05:00",
20       "riego_end_time": "",
21       "riego_duration": "",
22       "consumo_litros": ""
23     },
24     "ventilacion": {
25       "estado": "on",
26       "ventilacion_id": 123564,
27       "ventilacion_start_time": "2024-10-16 4:05:00",
28       "ventilacion_end_time": "",
29       "ventilacion_duration": ""
30     },
31     "iluminacion": {
32       "estado": "on",
33       "iluminacion_id": 123564,
34       "iluminacion_start_time": "2024-10-16 4:05:00",
35       "iluminacion_end_time": "",
36       "iluminacion_duration": ""
37     }
38   },
39   "timestamp": "2024-10-16 4:05:00"

```

Nota: Elaboración propia

H.6. Diseño de la Interfaz de Usuario

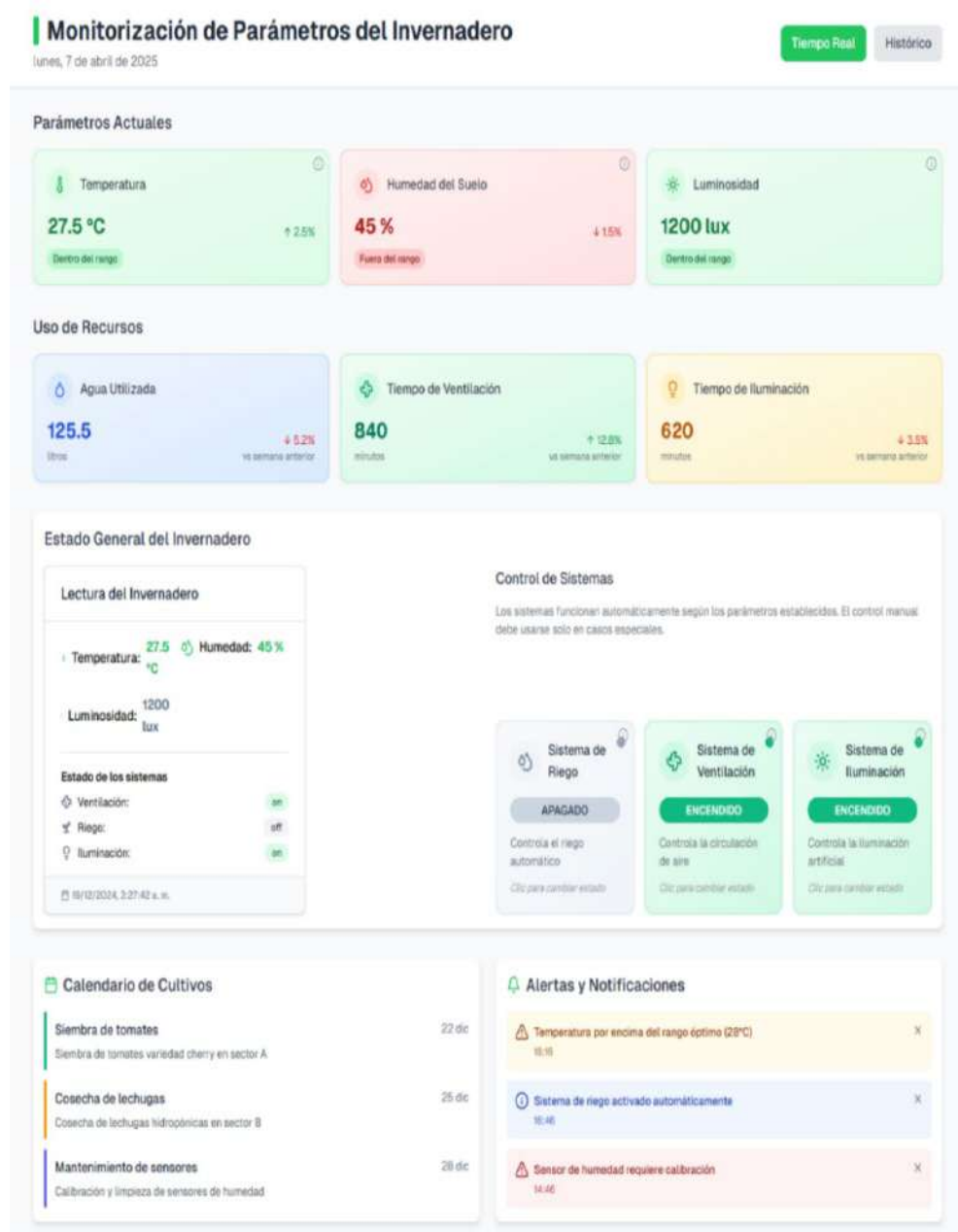
En la Figura H9 y Figura H10 se muestra la maqueta del dashboard diseñada para el monitoreo de parámetros del invernadero, en el cual se decidió mostrar

lo siguiente:

- a) Lectura de sensores en tiempo real (luz, humedad del suelo y temperatura)
- b) Consumo total de agua en litros
- c) Tiempo de encendido del ventilador
- d) Tiempo de encendido de la iluminación
- e) Diagramas de Temperatura vs. Tiempo, humedad del suelo vs. Tiempo, Luz vs. Tiempo

Figura H9

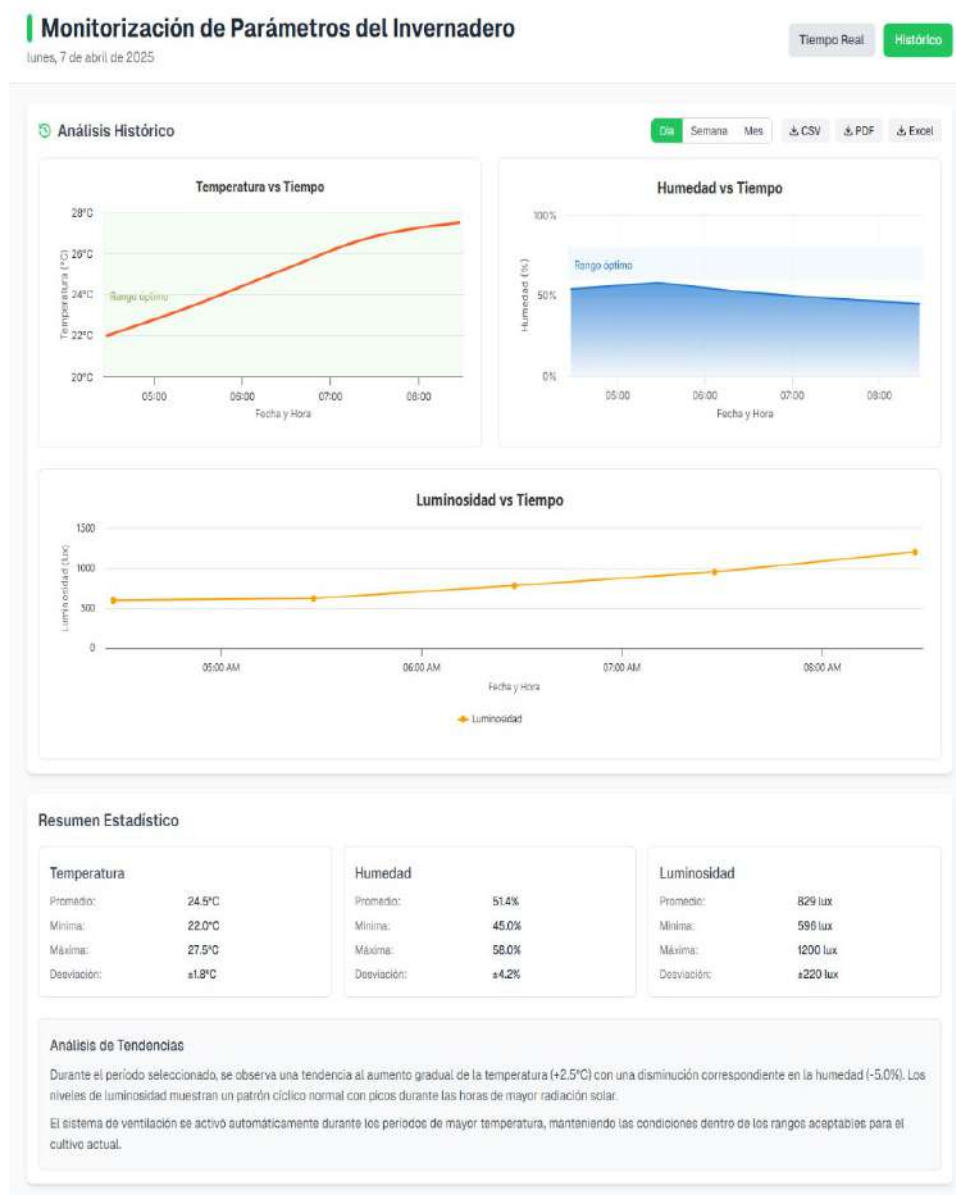
Dashboard del invernadero



Nota: Elaboración propia

Figura H10

Dashboard del invernadero



Nota: Elaboración propia

H.8. Desarrollo del Frontend

La interfaz de usuario (El dashboard) se implementó usando la librería React.js con arquitectura de componentes con el objetivo de reutilizar los componentes mediante la creación de módulo independientes. Para los estilos se usó el preprocesador de estilos Sass y la librería Tailwind para garantizar responsividad en dispositivos móviles y computadoras.

H.9. Desarrollo del Backend:

El backend del sistema se ha desarrollado usando Typescript y Node.js, implementado una arquitectura API RESTfull para proporcionar una forma flexible, ligera y escalable de integración con el frontend. Además, se ha incorporado el uso de WebSocket, para una comunicación en tiempo real entre el microcontrolador Esp32 y la aplicación.

Cuando el Esp32 envía los datos, el backend guardará en base de datos las lecturas y enviará al frontend la nueva actualización de este modo el frontend reflejará las condiciones del invernadero en tiempo real.

Se crearon modelos que representan la estructura como se guardan los datos en MongoDB, como se indica en la Figura H11, para más detalles de cada modelo revisar Anexo S.

Los modelos Lighting, Ventilation y Watering fueron diseñados para llevar un seguimiento de cada sesión (periodo) de iluminación, ventilación y riego, respectivamente. La Figura H12 muestra documentos de ejemplo como se guardan en base de datos, como se puede ver cada documento incluye el momento de inicio y fin de la sesión, permitiendo calcular con precisión el tiempo de funcionamiento de cada sistema. En el caso del modelo Watering, además de registrar la duración, se almacena la cantidad de litros de agua consumidos durante cada sesión. Esta información permite no solo conocer el consumo total de agua, sino también analizar patrones, calcular el promedio de consumo por sesión y evaluar la eficiencia del sistema a lo largo del tiempo.

Figura H11

Modelos de la base de datos



Nota: Elaboración propia

Figura H12

Documentos guardados en base de datos de acuerdo con los modelos

Documento GreenhouseReading <pre> _id: ObjectId('6805bac062d6656715c1a585') reading_id: "e4658484-119b-4487-baee-9dc64a52f7a9" temperature: 10 humidity: 67 light: 0 soil_humidity: Array (5) 0: 60 1: 50 2: 56 3: 53 4: 50 fan_status: "off" irrigation_status: "off" light_status: "off" timestamp: "2024-10-21 00:00:00" </pre>	Documento VentilationSession <pre> _id: ObjectId('6805b79a62d6656715c1a4c1') status: "on" ventilation_id: "275b9190-ea1e-4920-8ccd-1a5b91227fd3" start_time: "2024-10-23 12:00:00" end_time: "2024-10-23 13:00:00" duration: 3600 reading_id: "6be1c813-281c-41ae-8c72-06d5efed9fc9" </pre>
Documento LightingSession <pre> _id: ObjectId('6805bad362d6656715c1adf6') status: "on" light_id: "dcbcb93b-2632-4960-8803-c11ac4ef3d20" start_time: "2024-10-23 06:00:00" end_time: "2024-10-23 07:00:00" duration: 3600 reading_id: "48745944-6535-4008-acb9-7a9444d4e943" </pre>	Documento WateringSession <pre> _id: ObjectId('6805b50062d6656715c19fe2') status: "on" irrigation_id: "f978d869-e1ce-4ce5-9b2f-8935c6944473" start_time: "2024-10-21 16:50:00" end_time: "2024-10-21 17:12:00" duration: 1320 consumption_liters: 22 reading_id: "774cc726-98f4-40cc-a69b-7898ba7ea822" </pre>

Nota: Elaboración propia

Anexo I:

Simulación

Para validar el funcionamiento del sistema antes de la implementación física, se realizaron simulaciones utilizando Wokwi, un simulador en línea de IoT y sistemas embebidos que permiten el desarrollo y realizar pruebas de proyectos basados en ESP32, Arduino, Raspberry Pi, STM32, entre otros dispositivos, facilitando el comportamiento de la lógica de control.

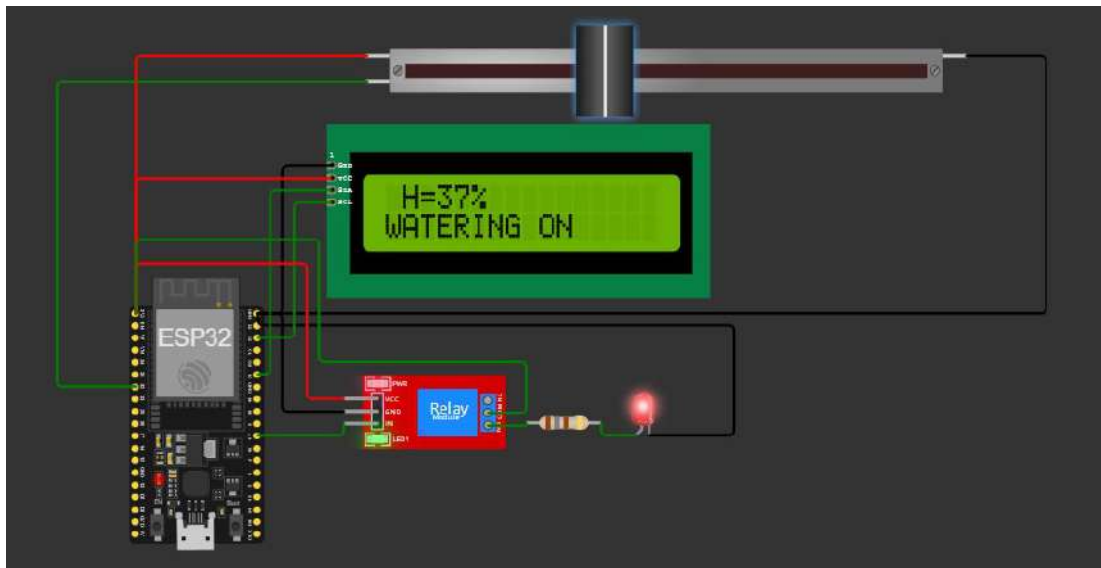
Simulación del Control de Humedad del Suelo. Para la simulación de control de humedad del suelo se utilizó un LED como representación visual de la activación de la válvula selenoide encargada de abrir o cerrar el paso de agua para el riego. Además, se empleó un potenciómetro para simular el comportamiento del sensor resistivo FC-28, el cual permite ajustar manualmente los niveles de humedad y observar la respuesta del sistema de control.

En la Figura I1 se observa un sistema de riego en estado activo. Se ajustó manualmente el potenciómetro (sensor FC-28) hasta obtener un valor de humedad de 37%, el cual es menor al umbral inferior (50%), lo que activa el sistema de riego. Como se muestra en la figura el LED (válvula selenoide) se enciende.

Continuando con la simulación, se aumenta gradualmente la resistencia del potenciómetro hasta que el valor de humedad alcance el 76%, superando el umbral superior (75%), tal como muestra la Figura I2. En ese momento, el LED (válvula selenoide) se apaga. El sistema permanece apagado hasta que la humedad descienda nuevamente al umbral inferior (50%), simulando así el comportamiento de control de humedad del suelo por ciclo por histéresis.

Figura I1

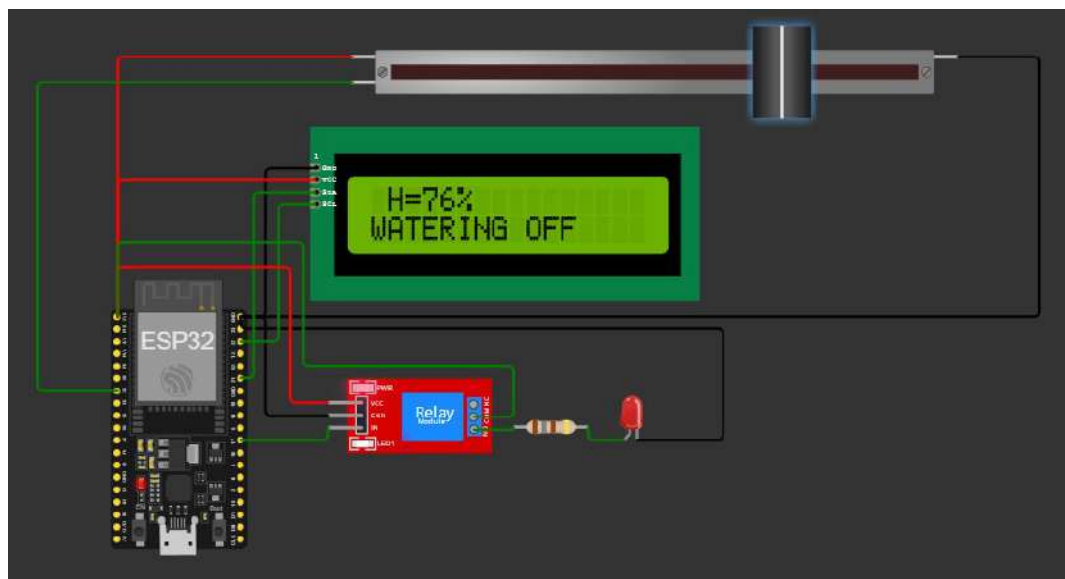
Simulación de control de humedad del suelo (Riego Activado)



Nota: Elaboración propia

Figura I2

Simulación de control de humedad del suelo (Riego Inactivo)

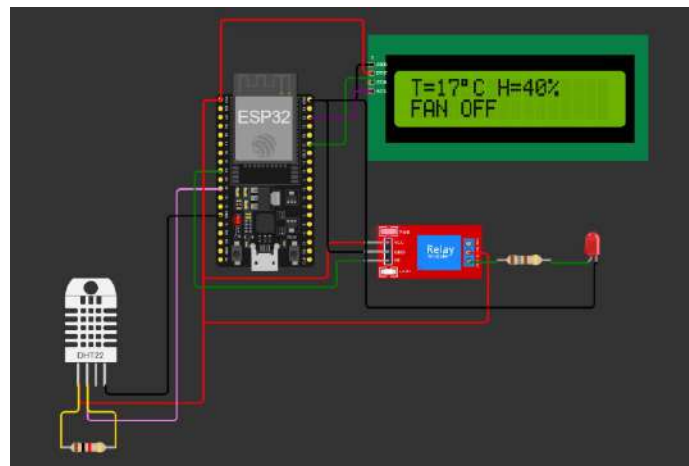


Nota: Elaboración propia

Simulación del Control de Temperatura. Para la simulación de control de temperatura se utilizó un LED para representación de la activación o desactivación del ventilador. En la Figura I3, se observa cuando el sistema mantiene una temperatura dentro del rango aceptable (17°C), por lo que el LED (ventilador) permanece apagado. En contraste, la Figura I4, la temperatura del sistema ha excedido el umbral superior (25°C), en respuesta, el LED (ventilador) se enciende. El LED (ventilador) permanece encendido hasta que la temperatura descienda a 15°C , simulando así el control de temperatura por ciclo de histéresis.

Figura I3

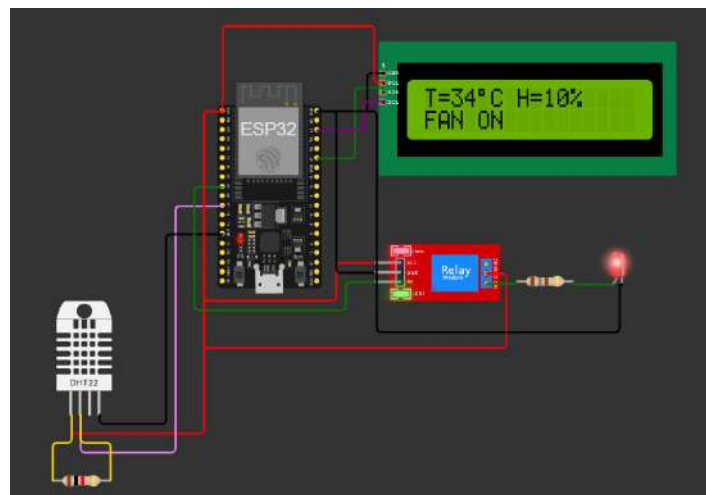
Simulación de control de humedad del suelo (Riego Inactivo)



Nota: Elaboración propia

Figura I4

Simulación de control de humedad del suelo (Riego Inactivo)



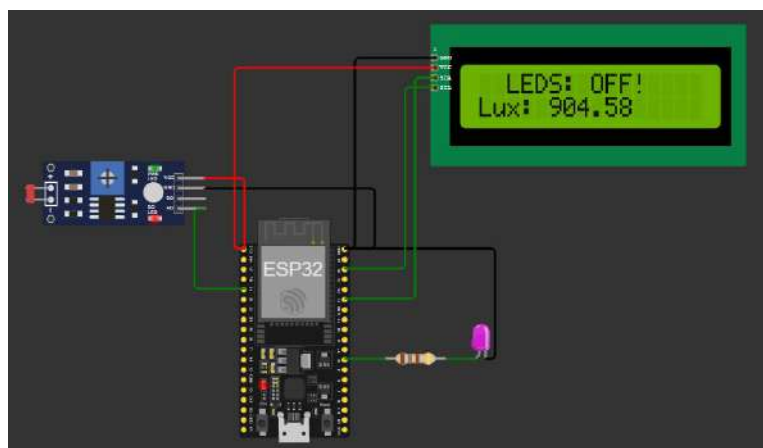
Nota: Elaboración propia.

Simulación de Control del Sistema de Iluminación. Para realizar la simulación de este lazo, utilizamos un LED como representación visual del encendido y apagado de la tira LED que iluminará dentro del invernadero. La Figura I5 representa el sistema de iluminación apagado, son las 6:20 a.m. el sensor BH-570 detecta 904 lux, supera el umbral inferior (400 lux), por lo que el LED (tira LED) está apagado. Por el contrario.

En cambio, en la Figura I6 corresponde a las 5:40 p.m., en ese momento el sensor detecta 75 lux, inferior al umbral definido y la hora es menor de las 8:00 p.m. Como consecuencia, el LED se enciende (tira LED).

Figura I5

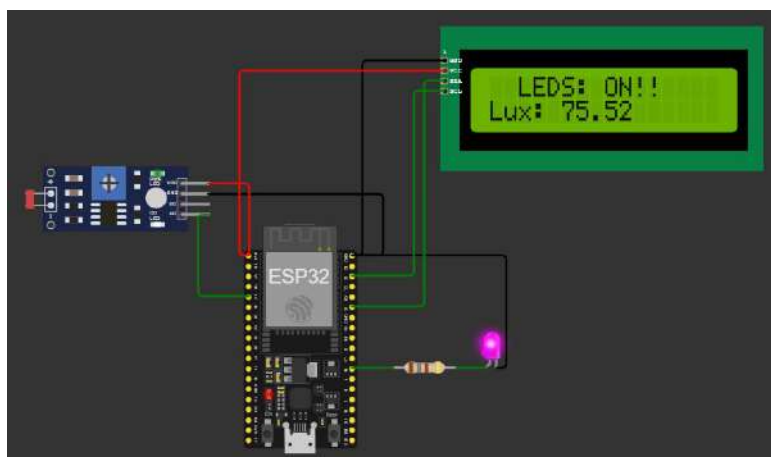
Lazo de control de luz (luz apagada)



Nota: Elaboración propia

Figura I6

Lazo de control de luz (luz encendida)



Nota: Elaboración propia

Anexo J:

Despliegue de la Aplicación Web

Para el monitoreo del sistema IoT, se desplegó la aplicación web en línea, con el objetivo de tener acceso remoto desde cualquier ubicación con conexión a internet. Esto facilita el monitoreo del invernadero, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo la necesidad de intervención presencia constante.

Railway (Para el Backend). Es una plataforma en la nube que permite desplegar y escalar aplicaciones backend, con capacidad de integrarse con bases de datos (MongoDB Atlas, por ejemplo) como con Github. Se escogió esta tecnología para almacenar y ejecutar la API para monitoreo y control del invernadero inteligente, debido a su facilidad de uso ya la automatización del despliegue.

La integración con Github permite que cualquier cambio posterior al primer despliegue se vuelva a desplegar automáticamente que se hagan en el código, Railway vuelve a desplegar el código automáticamente, lo que optimiza el tiempo de desarrollo de código.

Además, los beneficios del plan gratuito de Railway es suficiente para el propósito del proyecto.

MongoDB Atlas. Es un servicio de base de datos en la nube, el cual es administrado por MongoDB (Sistema de gestión de bases de datos NoSQL). Permite almacenar, consultar y gestionar datos. Se escogió esta tecnología para almacenar los registros de los sensores, eventos y estatus del sistema por su facilidad de usar y la compatibilidad con aplicaciones backend desarrolladas con Node.js.

Además, los beneficios del plan gratuito de MongoDB Atlas son suficientes para el propósito del proyecto.

Vercel (Para el Frontend). Vercel es una plataforma de desarrollo y alojamiento (hosting) que permite desplegar aplicaciones frontend. Es compatible con tecnología como React, Next.js y Vue.js.

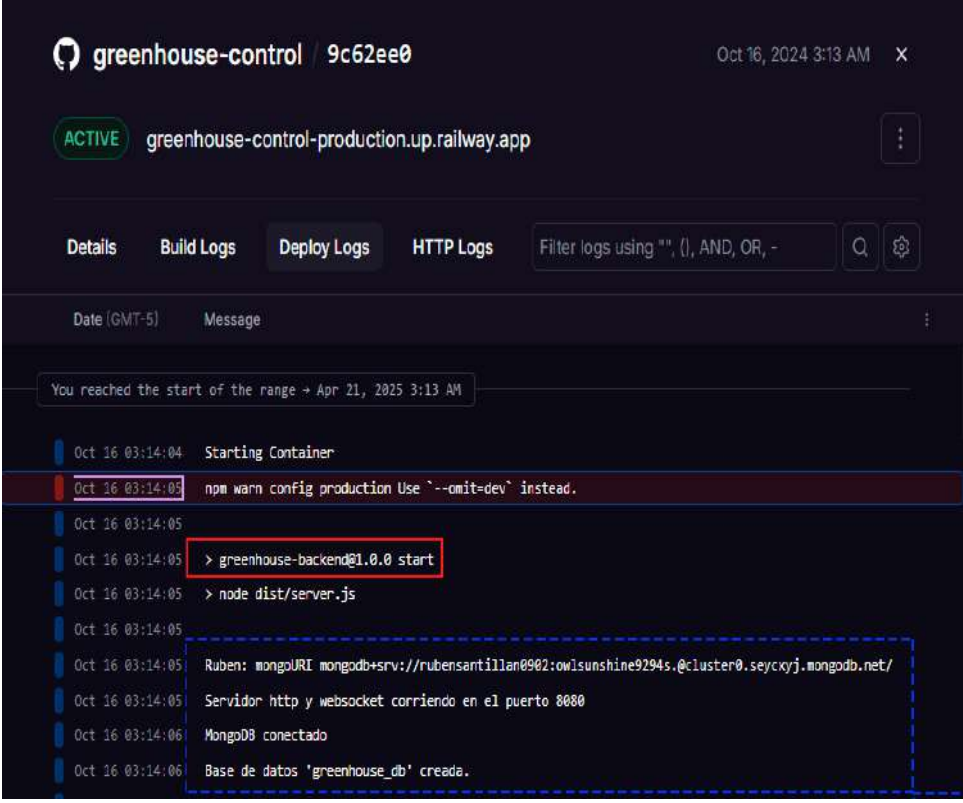
Se escogió esta plataforma por su facilidad de uso, el despliegue es automático al igual que Railway, lo que optimiza el tiempo de desarrollo de código.

Además, los beneficios del plan gratuito de Vercel son suficientes para el propósito del proyecto.

Lo primero que se tiene que hacer es crear una cuenta en MongoDB Atlas, para que el backend con las credenciales que otorga MongoDB Atlas pueda crear y consultar la base de datos. El backend se desplegó en la plataforma Railway, en la Figura J1 se muestra que el servidor web corriendo en el puerto 8080 y se creó la base de datos `greenhouse_db`, listo para recibir peticiones. Mientras que el frontend se desplegó en la plataforma Vercel, en la Figura J2 se muestra el estado del proyecto desplegado y se le asignó un dominio. Usando ese dominio se puede acceder al dashboard (luego de hacer login o registro de usuario) como se muestra en la Figura J3.

Figura J1

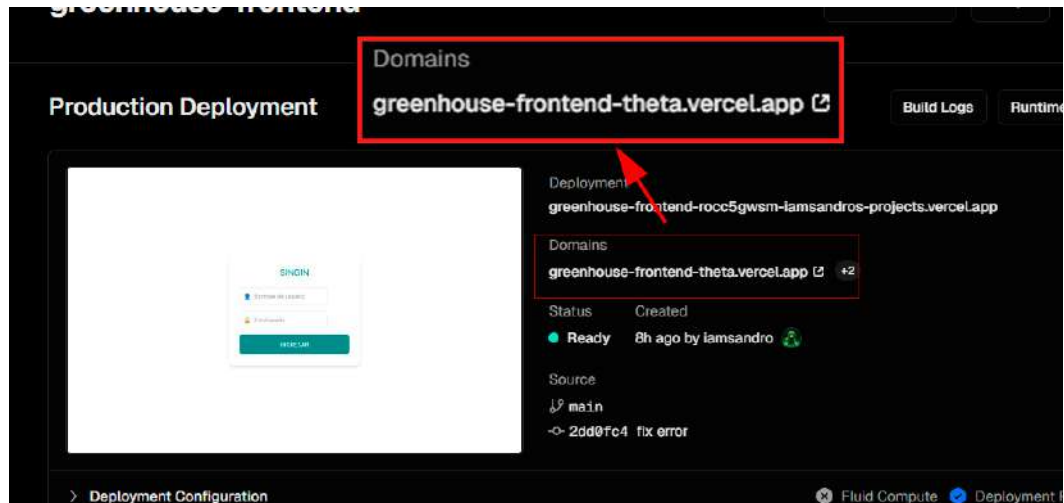
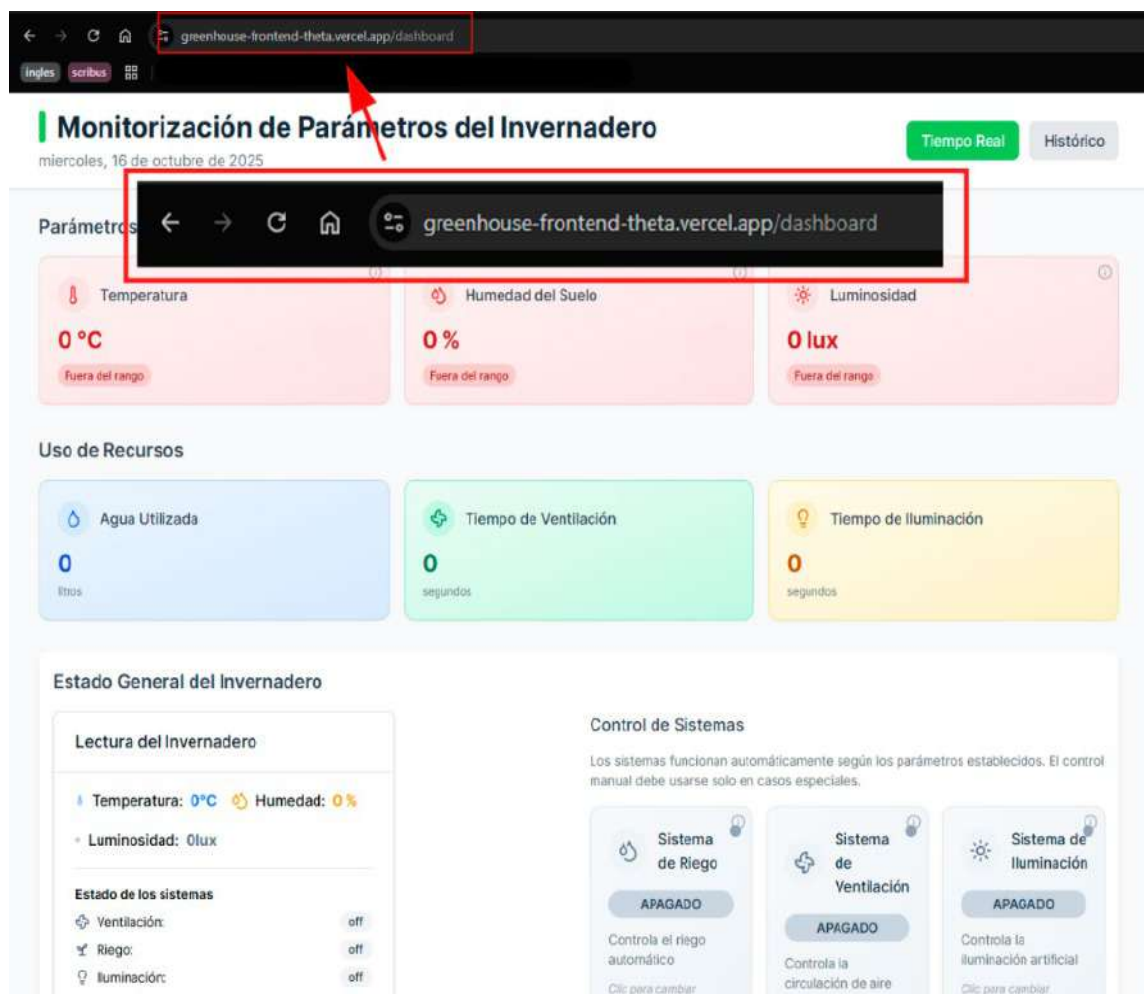
Backend desplegado en Railway



The screenshot shows the Railway dashboard for a project named 'greenhouse-control' with ID '9c62ee0'. The deployment is marked as 'ACTIVE' and the URL is 'greenhouse-control-production.up.railway.app'. The 'Deploy Logs' tab is selected, showing a list of logs with columns for 'Date (GMT-5)' and 'Message'. The logs indicate the container starting, an npm warning, the command to start the application, and the successful connection to MongoDB Atlas and creation of the 'greenhouse_db' database.

```
Oct 16 03:14:04 Starting Container
Oct 16 03:14:05 npm warn config production Use `--omit=dev` instead.
Oct 16 03:14:05 > greenhouse-backend@1.0.0 start
Oct 16 03:14:05 > node dist/server.js
Oct 16 03:14:05 Ruben: mongoURI mongodb+srv://rubensantillan0902:owlsunshine9294s@cluster0.seyckxj.mongodb.net/
Oct 16 03:14:05 Servidor http y websocket corriendo en el puerto 8080
Oct 16 03:14:06 MongoDB conectado
Oct 16 03:14:06 Base de datos 'greenhouse_db' creada.
```

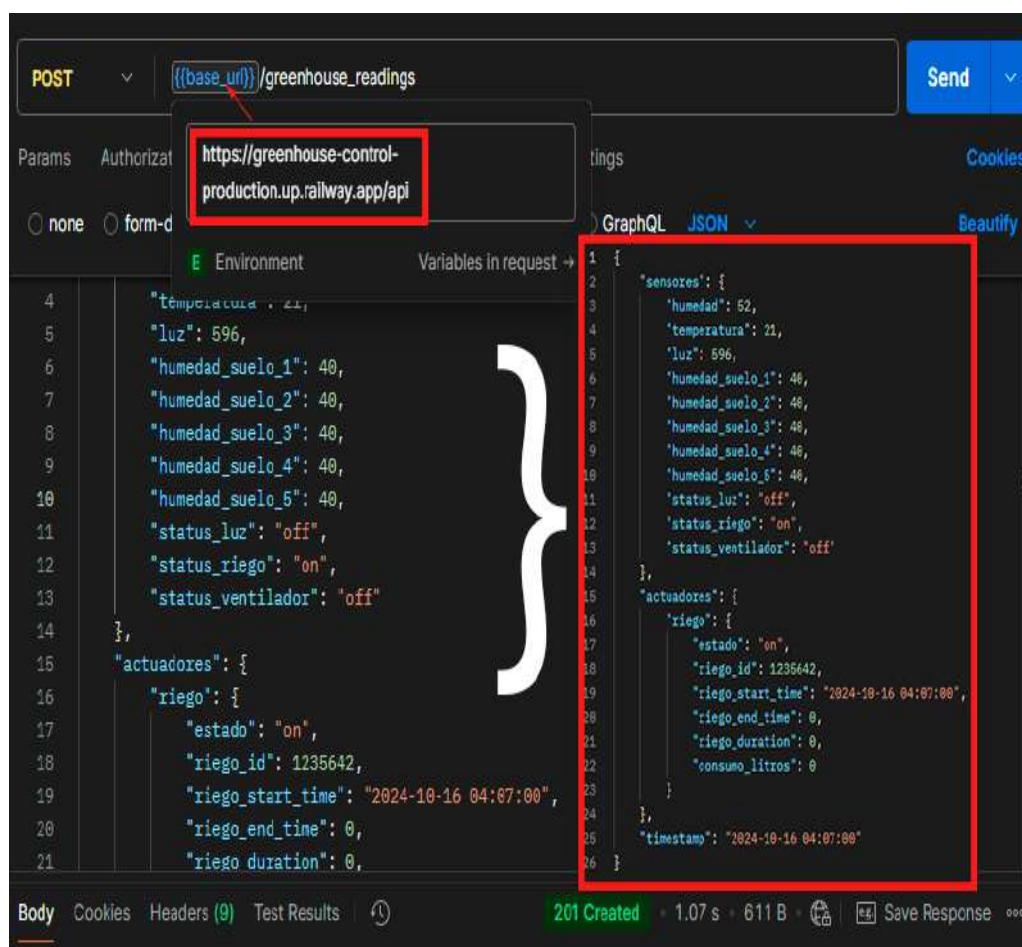
Nota: Captura obtenida de la plataforma Railway

Figura J2*Backend desplegado en Railway**Nota: Captura obtenida de la plataforma de Vercel***Figura J3***Frontend desplegado (dashboard)**Nota: Elaboración propia*

Cada vez que el microcontrolador reciba un nuevo registro realiza un request POST a la URL `https://greenhouse-control-production.up.railway.app/api/greenhouse_readings` incluyendo en el cuerpo del request los datos estructurados, como se describe en secciones anteriores. En la Figura J4 se muestra un ejemplo de request en Postman que se utilizó para la prueba funcional.

Figura J4

Request tipo post al backend



Nota: Captura obtenida del software Postman

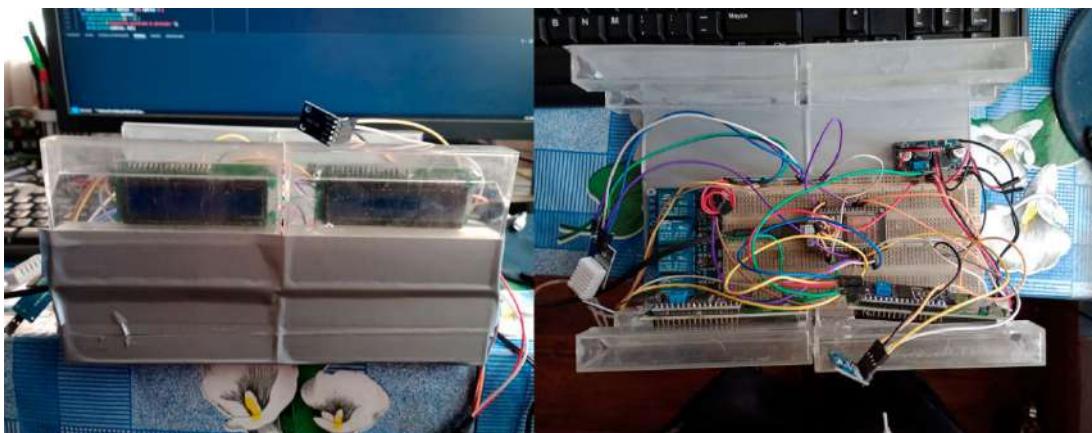
Anexo K:

Pruebas del Sistema IoT

Durante esta fase se realizaron prueba de sensores, activación desactivación de actuadores según las condiciones programadas, verificación del funcionamiento de la lógica de control por ciclo de histéresis. En la Figura J1 se observa el circuito implementado.

Figura K1

Implementación del circuito



Nota: Elaboración propia

Prueba de Funcionamiento del Control del Riego. Para garantizar el correcto funcionamiento de los sensores de humedad del suelo FC-28, se realiza la calibración correspondiente. La calibración de estos sensores consiste en obtener los valores de referencia para las condiciones extremas: el valor que el sensor FC-28 registra cuando el suelo del invernadero está completamente seco se considera el 0%, mientras que el valor registrado por el FC-28 en un suelo saturado de humedad se considera como el 100%. Para la calibración y para las pruebas, se utilizó la misma tierra sobre la cual se implementó el invernadero. Esto permitió asegurar los registros del sensor reflejaran las condiciones reales del suelo.

Para probar el funcionamiento se usó tierra seca y luego se fue humedeciendo para ver si el sistema es capaz de controlar la válvula selenoide de 12V.

En la Figura J2 se presenta las humedades registradas por los sensores fc-28. Estos valores están por debajo del rango óptimo, por lo que el sistema de riego se activa, esta acción se muestra en el segundo LCD donde vemos “Water: ON” que indica el estatus activo del sistema de riego.

En la Figura K3 se evidencia la activación del relé que permite la activación del sistema de riego. A su vez, la Figura K4 muestra la válvula selenoide normalmente cerrada se abre, lo que permite el paso de agua hacia el sistema de riego.

En la Figura K5 se muestra los documentos generados en base de datos, mismo que son enviados al frontend mediante WebSocket, cómo se muestra en la Figura K6 el dashboard se actualizó en tiempo real, mostrando el promedio de las humedades registrada y el estatus actual del sistema de riego.

Figura K2

Registros de humedad del suelo y estatus del sistema de riego en los LCD durante la prueba de humedad del suelo fuera de rango bajo



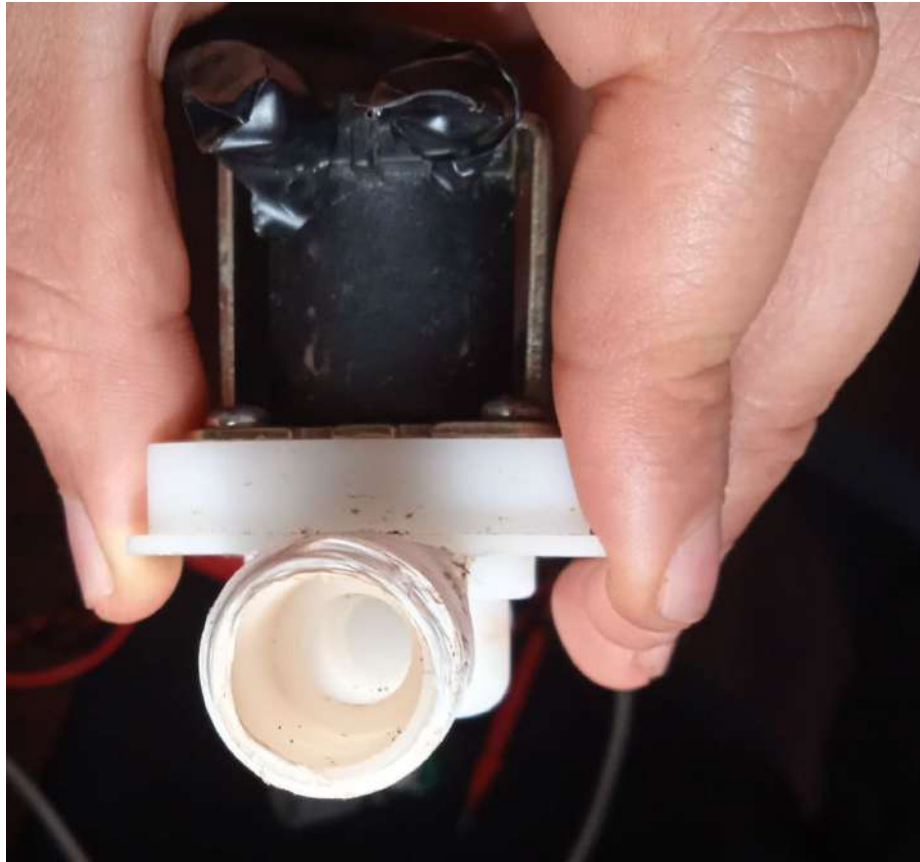
Nota: Elaboración propia

Figura K3

Registros de humedad del suelo y estatus del sistema de riego en los LCD durante la prueba de humedad del suelo fuera de rango bajo



Nota: Elaboración propia

Figura K4*Apertura de la válvula solenoide**Nota: Elaboración propia***Figura K5***Documentos generados en base de datos con la primera prueba de funcionamiento de control de humedad*

```

_id: ObjectId('6805bac062d6656715c1a585')
temperature: 10
humidity: 55
light: 190
▼ soil_humidity: Array (5)
  0: 32
  1: 30
  2: 28
  3: 31
  4: 30
fan_status: "off"
irrigation_status: "on"
light_status: "off"
timestamp: "2024-10-17 06:11:52"
greenhouse readings

_id: ObjectId('6805b56062d6656715c19fe2')
status: "on"
irrigation_id: "4a7d2db0-2735-4df8-8c12-82a9b94f65b4"
start_time: "2024-10-17 16:11:52"
end_time: ""
duration: 0
consumption_liters: 0
reading_id: "6805bac062d6656715c1a585"
watering sessions

```

Nota: Captura obtenida de MongoDB Compass

Figura K6

Actualización de registros de humedad en el Dashboard durante la prueba de humedad fuera de rango



Nota: Elaboración propia

Se agrego agua sobre la tierra de prueba con el objetivo de incrementar la humedad hasta superar el rango optimo establecido (menor de 75%). Como se observa en la Figura K7, los registros de los sensores FC-28 marcan 75% en promedio, por lo que el sistema de riego se desactiva, indicando “Water: off” en segundo LCD. La válvula selenoide se volvió a cerrar, restringiendo el paso de agua al sistema de riego.

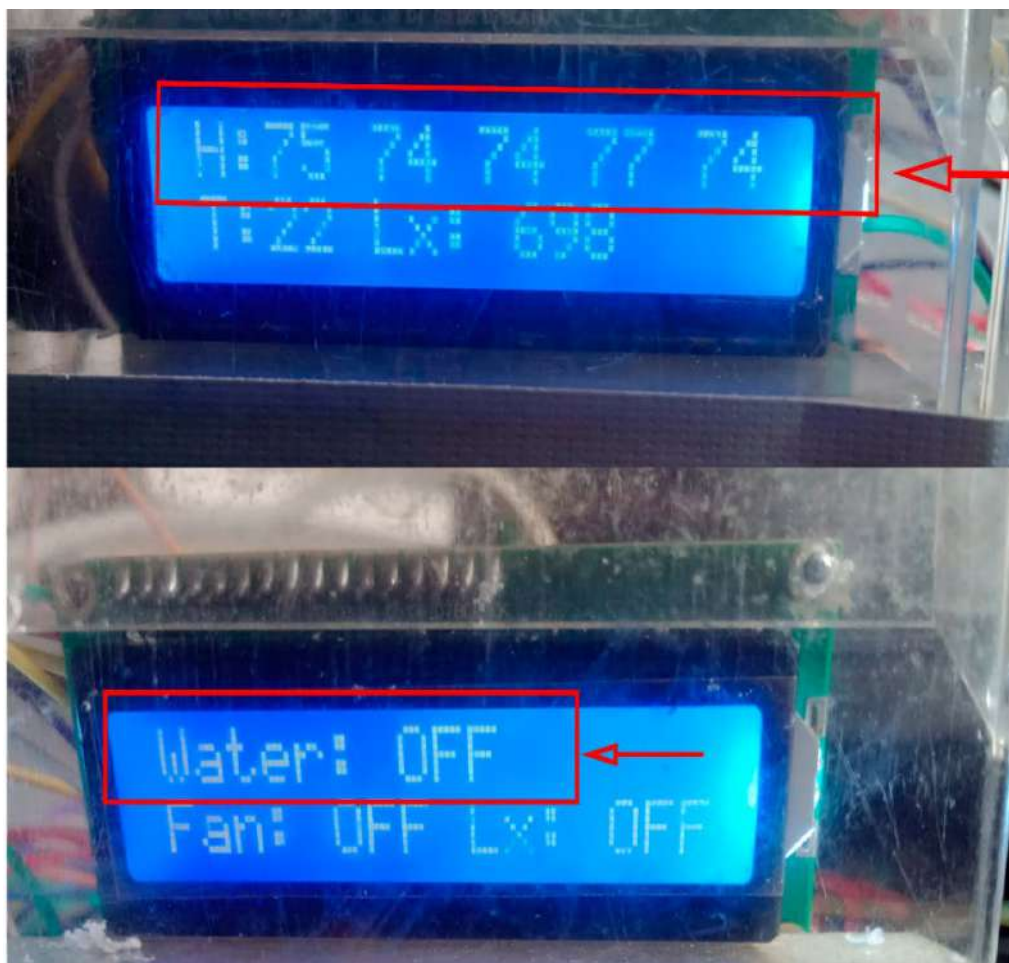
En la Figura K8 se muestra cómo el documento generado al iniciar una sesión de riego se actualiza posteriormente, añadiéndose los valores correspondientes a los campos end_time y duration. En la prueba realizada, la humedad fue incrementada de forma manual para simular el cierre de la sesión; sin embargo, en condiciones reales dentro del invernadero, el sensor de flujo estimará automáticamente la cantidad de agua utilizada en cada sesión.

De esta manera, el sistema también actualizará el campo consumption_liters en la base de datos, permitiendo un seguimiento preciso del consumo de agua por evento de riego.

La Figura K9 muestra cómo el Dashboard también se actualizó en tiempo real, mostrando el valor actual de la humedad del suelo y el estado del sistema de riego.

Figura K7

Registros de humedad del suelo y estatus del sistema de riego en los LCD durante la prueba de humedad del suelo fuera de rango alto



Nota: Elaboración propia

Figura K8

Actualización de la sesión de riego

```
_id: ObjectId('6805b56062d6656715c19fe2')
status : "off"
irrigation_id : "4a7d2db0-2735-4df8-8c12-82a9b94f65b4"
start_time : "2024-10-17 16:11:52"
end_time : "2024-10-17 16:12:25"
duration : 33
consumption_liters : 0
reading_id : "6805bac062d6656715c1a585"
```

Nota: Captura obtenida de MongoDB Compass

Figura K9

Registros de humedad del suelo y estatus del sistema de riego en los LCD durante la prueba de humedad del suelo fuera de rango bajo



Nota: Elaboración propia

Finalmente, se dejó que la humedad del suelo disminuyera hasta alcanzar el umbral inferior del rango establecido (50%). Al llegar a este valor, el sistema de riego se reactiva nuevamente, tal como se esperaba según la lógica de control. Este comportamiento se observa en la Figura K10, donde se muestra la gráfica Humedad del Suelo vs. Tiempo.

Figura K10

Gráfica del control de humedad del suelo vs. Tiempo del Dashboard



Nota: Elaboración propia

Prueba de Funcionamiento del Control de Ventilación. El módulo sensor DHT22 no requiere calibración, por lo tanto, se procedió directamente a realizar pruebas de funcionamiento del sistema de control de ventilación. Para la prueba no se utilizó un ventilador, ya que su instalación se determinó con el montaje del invernadero. No obstante, ya que el ventilador 220VAC será controlado mediante un relé, la activación del relé se usó como indicador funcional de la activación del sistema de ventilación.

Para simular el aumento de temperatura se usó una secadora de pelo para calentar el sensor DHT22. Inicialmente, el sensor DHT22 registraba una temperatura de 22°C, al aplicar calor, se observó que el sensor DHT22 registró un incremento abrupto de la temperatura hasta 35°C, superando ampliamente el umbral superior establecido, 25°C. En la Figura K11, en el primer LCD se muestra el envío de la señal de activación del sistema de ventilación ("FAN: ON"). y en el segundo LCD, se muestra como la temperatura empieza a descender a 28°C, valor aún superior al umbral superior establecido.

La activación del relé que controla el ventilador se evidencia en la Figura K12, lo cual muestra la correcta ejecución del sistema de control. Igual que en el caso del control de humedad del suelo en base de datos se genera un documento de la sesión de ventilación guardando el inicio de la ventilación para el cálculo de tiempo encendido del ventilador durante la sesión o evento de ventilación.

Así mismo, la Figura K13 muestra que el dashboard se actualiza en tiempo real, reflejando el valor actual de la temperatura.

La Figura K14 presenta la gráfica Temperatura vs Tiempo, donde se aprecia la subida abrupta de temperatura al aplicar calor, seguido de un descenso rápido tras apagar la secadora de pelo.

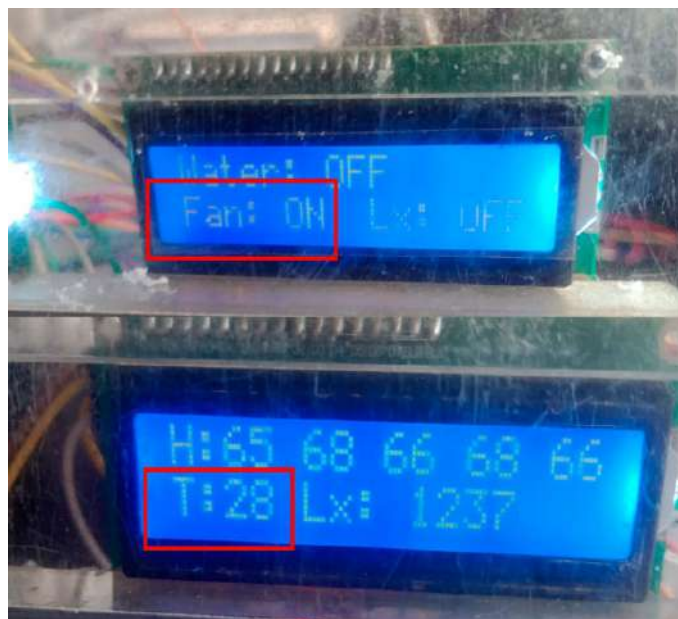
El relé siguió encendido hasta que el sensor registró la temperatura 22 °C, valor definido como umbral inferior, y en consecuencia en un escenario real se apaga el ventilador y en base de datos se actualiza el documento de la sesión de ventilación, añadiendo valor a los campos de duración y el tiempo de fin de la sesión.

Posteriormente, El relé no se volvió activarse hasta que se volvió aplicar calor

con la secadora de pelo y la temperatura superó el umbral superior, momento en el cual se reactivó el sistema. Este funcionamiento, evidenció el correcto control por ciclo de histéresis.

Figura K11

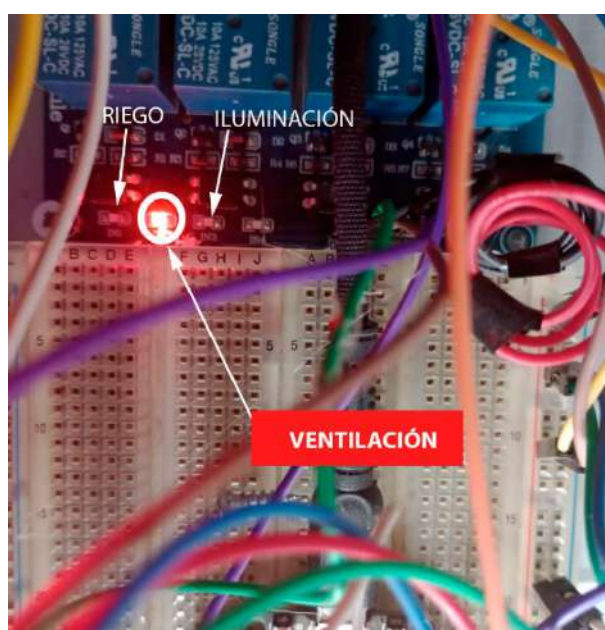
Registro de temperatura y estatus del ventilador para prueba de control de ventilación



Nota: Elaboración propia

Figura K12

Activación del relé de control de ventilación



Nota: Elaboración propia

Figura K13

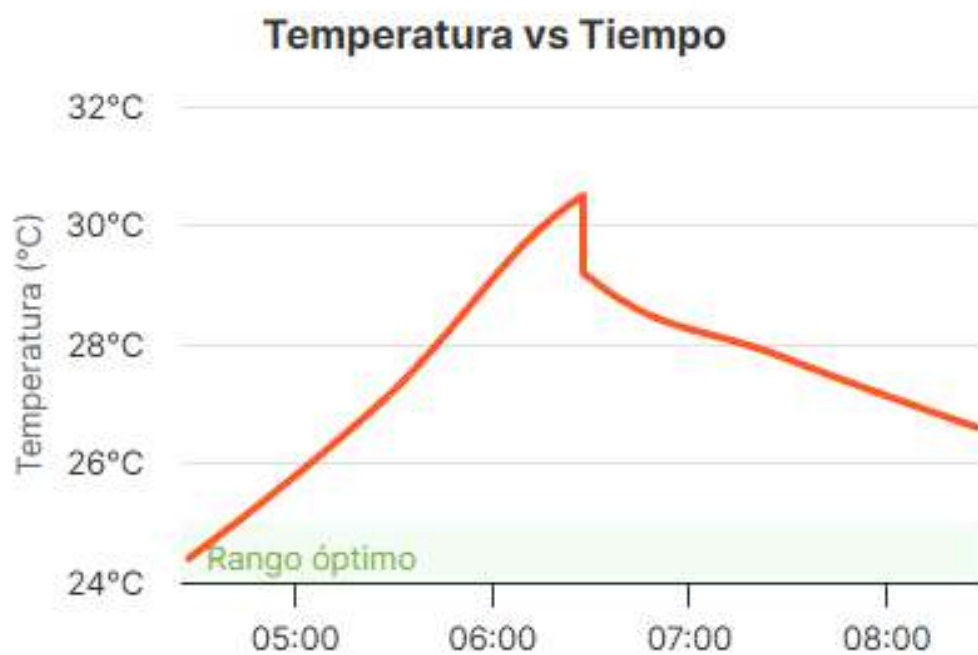
Registro de temperatura y estatus del ventilador en el dashboard



Nota: Elaboración propia

Figura K14

Grafica Temperatura vs Tiempo generado en el Dashboard



Nota: Elaboración propia

Prueba de Funcionamiento del Control de Iluminación. El módulo sensor BH1750 no requiere calibración por lo cual se procedió directamente a realizar la comprobación del sistema de control. Para esta prueba no se ha utilizado la cinta de LED aún, ya que se determinó su instalación dentro del invernadero. Sin embargo, ya que la cinta LED opera con 5 V, lo cual es compatible con la salida (HIGH) del Esp32, por lo que un relé de 5 V sirvió como un indicador perfecto para la activación del sistema de iluminación.

La prueba se realizó de la siguiente manera: inicialmente el sensor BH1750 registraba un valor de 358 lx, superior al umbral de 150 lx establecido para el encendido del sistema de iluminación. A continuación, se cubrió el sensor manualmente para simular una condición de baja iluminación. El valor registrado descendió drásticamente a 41 lx, tal como se muestra en la Figura K15, activando la señal del encendido del sistema de iluminación como se evidencia en el segundo LCD de la figura.

La Figura K16 muestra que el Esp32 activó correctamente el relé de la iluminación como se esperaba. Igual que en el caso del control de humedad del suelo y temperatura en base de datos se genera un documento de la sesión de iluminación guardando el inicio de la iluminación para el cálculo de tiempo encendido del sistema de iluminación durante la sesión de iluminación artificial.

En la Figura K17, se evidencia que el dashboard se actualiza en tipo real, reflejando el estado actual del sistema. Cuando el sensor es expuesto nuevamente a la luz, al alcanzar el umbral máximo de 150 lx, el sistema se apagó, y en base de datos se actualizó el documento de sesión de iluminación actualizándose el tiempo de fin de sesión y la duración.

Finalmente, la Figura K18 presenta la gráfica Iluminación vs. Tiempo, donde se observa una caída abrupta hasta el valor 41 lx, seguido por un aumento repentino al destapar el sensor BH1750, lo que valida el funcionamiento esperado del control de iluminación.

Figura K15

Registro de luminosidad y estatus de la cinta LED para prueba de control de ventilación con luminosidad de 45 luxes



Nota: Elaboración propia

Figura K16

Activación del relé de control de iluminación



Nota: Elaboración propia

Figura K17

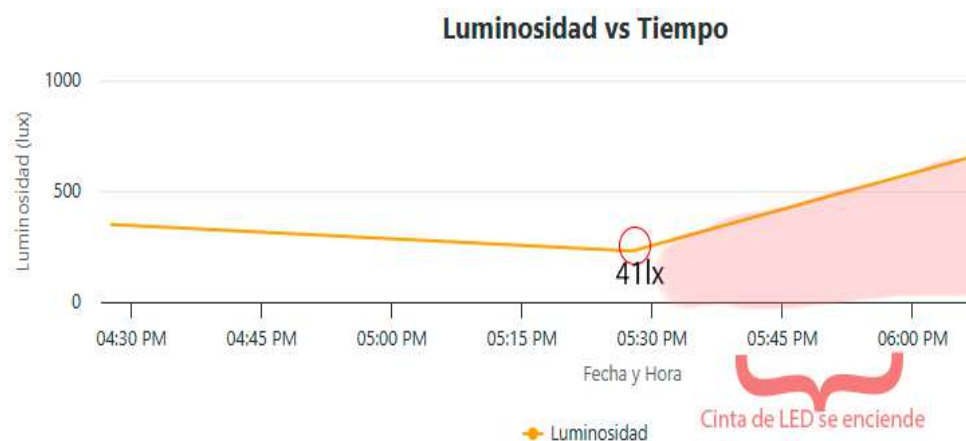
Registro de temperatura y estatus del ventilador en el dashboard



Nota: Elaboración propia

Figura K18

Grafica Luminosidad vs Tiempo generado en el Dashboard



Nota: Elaboración propia

Anexo L:

Elección y justificación del tipo de Invernadero

L.1. Tipo de invernadero

En la tabla L1, se muestran los criterios para la elección del tipo de invernadero a implementar.

Tabla L1*Características necesarias para la elección del invernadero a construir*

Condiciones del proyecto	Características necesarias del invernadero para el proyecto
Presupuesto limitado (S/. 1500)	Materiales y herramientas de construcción de bajo costo.
Mano de obra limitada (1 persona)	Fácil de construir
Alta precipitación (noviembre a abril)	Impermeabilidad de agua
Presencia de fuertes vientos (marzo a setiembre)	Resistente a vientos fuerte
Materiales disponibles en la localidad (Madera, tubos PVC, acero)	Materiales accesibles

Nota. Elaboración propia

Justificación. Se ha elegido el invernadero tipo túnel, la forma curva de los invernaderos tipo túnel ayuda a resistir a los vientos, permite desviar fácilmente el agua de la lluvia (lo que reduce filtración de agua y daños estructurales) y son económicos y fáciles de construir lo que es perfecto dadas las condiciones del proyecto.

L2. Materiales para la construcción del invernadero

En la Tabla L2, L3 se comparan los materiales que se suele usar para la estructura y la cubierta del invernadero, con la finalidad de tener un panorama general y escoger el material más conveniente para el proyecto.

Tabla L2*Comparación de materiales accesibles para la construcción de un invernadero*

Ítem	Tubos PVC	Tubo Galvanizado	Madera
Precio	S/ 16.00	S/. 56.00	S/. 9.00
Medidas	1/2"x5m	1/2"x3m	5cm de diámetro aproximadamente, 3 metros de largo aproximadamente.
Desventajas	Vida útil de 3 a 5 años	Pesado, precio alto, requiere bastante mano de obra y costo	Pesado y no es un material flexible para la construcción de los

Ítem	Tubos PVC	Tubo Galvanizado	Madera
		adicional para el transporte y la implementación de los arcos.	arcos. Vida útil de 2 años.
Conclusión	Fácil de usar y precio cómodo	Elevado costo y difícil de trabajar	No se recomienda para construcción de un invernadero tipo túnel

Nota. Elaboración propia

Tabla L3

Comparación de Características Técnicas de Agrofílm

Característica	Film GEOACE	Film Polibag	Film Prodimex
Transmisión de Luz	79% $\pm$ 5	79% $\pm$ 5	79% $\pm$ 5
Termicidad	86% $\pm$ 5	84% $\pm$ 5	No especificado
Resistencia y Durabilidad	Resistencia a la tracción no especificada	MPa: DM 177	Resistencia a la tracción no especificada
Protección UV	Aditivos UV (absorbe radiación UV)	Bloqueo UV: 2% (290-340 nm)	Aditivos UV (no especificado)
Material y Composición	Polietileno de Baja Densidad (LDPE) con aditivos	PEMD 100% Virgen	Polietileno de Baja Densidad (LDPE)
Espesor	Calibre 8 (200 micras)	Calibre 10 (254 micras)	Calibre 10 (254 micras)
Precio por metro	S/ 19.76	S/ 11.60	S/ 24.00

Nota. Elaboración propia en base a las cotizaciones realizadas durante el desarrollo del proyecto.

Justificación. el material más adecuado para la estructura es el tubo PVC, por el precio y la flexibilidad de uso y manejo. Para la cobertura del invernadero es el agrofílm, debido a que es fácil de transportar, sencillo de instalar y su costo es considerablemente menor en comparación con el vidrio.

L.3. Definición de la Dimensión del Invernadero

Para formar los arcos se usarán tubos de PVC de 1/2" y 5 metros de largo, como el ancho de nuestro espacio es de 2.5 metros x 5 metros, cada tubo se

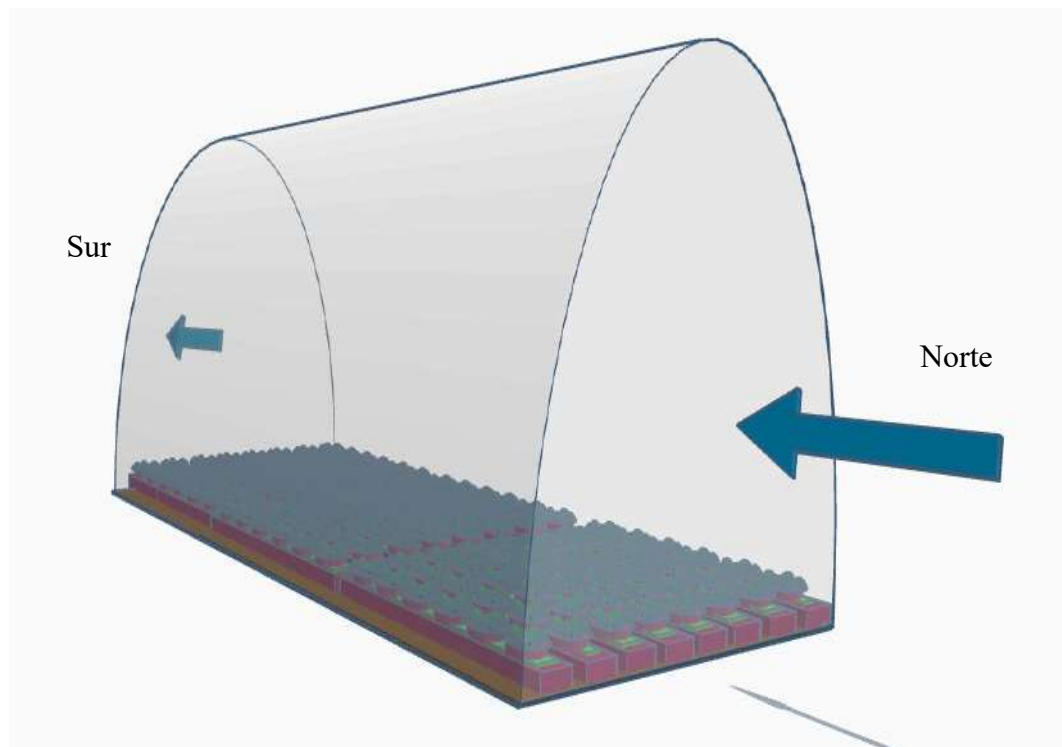
doblará formando un arco de diámetro de 2.5 metros.

L4. Orientación del invernadero

La cebolla china necesita entre 14 y 16 horas de luz, lo que significa que la orientación del invernadero tendría que ser de norte a sur para que las plantas reciban mayor cantidad de luz del sol como se ve en la Figura L1.

Figura L1

Orientación del Invernadero



Nota: Elaboración propia

Anexo M:

Implementación del Invernadero

Instalación del Sistema IoT en el Invernadero. Se procedió con la instalación del ventilador y la cinta LED dentro del invernadero, tal como se puede apreciar en la Figura M1. Asimismo, se instaló un repetidor de Wi-Fi, configurado como punto de acceso (access point), junto con la conexión de agua para el sistema de riego, como se muestra en la Figura M2. El repetidor nos asegurará cobertura estable de Wi-Fi en todo el interior del invernadero, condición necesaria para el funcionamiento del sistema IoT.

Figura M1*Instalación del ventilador y la cinta LED en el invernadero**Nota: Elaboración propia***Figura M2***Instalación del repetidor de Wi-Fi y la conexión de agua**Nota: Elaboración propia*

En la Figura M3 se muestra la preparación del terreno en surcos para la siembra de la cebolla china. El suelo fue previamente humedecido y picado con una lampa hasta obtener una textura suelta y fina, con el objetivo de facilitar el enraizamiento de los bulbos de cebolla china. Esta preparación es fundamental para promover un desarrollo radicular en las primeras semanas de la cebolla china.

Figura M3

Preparación del terreno del invernadero para el cultivo de cebolla china



Nota: Elaboración propia

Luego de la preparación del terreno, se procedió con la siembra de los bulbos de la cebolla china y la instalación del sistema de riego por goteo como se muestra en la Figura M4. Para ello, se extendieron mangueras con goteros autocompensantes, los cuales fueron ubicados cada 25 cm, entre surcos, de acuerdo con la posición de los bulbos sembrados para un suministro uniforme de agua a cada planta.

Figura M4

Despliegue de mangueras con los goteros para el riego



Nota: Elaboración propia

Como se aprecia en la Figura M5 se hizo la instalación del sistema IoT en el

invernadero, incluyendo todas las conexiones necesarias para su correcto funcionamiento. Se conectaron la electroválvula y el sensor de flujo al sistema de riego por goteo.

Asimismo, se procedió con la distribución e instalación de los sensores de humedad del suelo, ubicándolas estratégicamente para obtener lecturas representativas. Los módulos de sensores de DHT22 (temperatura) y BH1750 (Iluminación) fueron colocados en las posiciones más adecuadas para asegurar registros más reales al estado de humedad del suelo del invernadero.

Finalmente, se realizaron conexiones a los relés que permitirá al Esp32 el control de la electroválvula de 12V, el ventilador y la conexión a la cinta LED.

Figura M5

Instalación del sistema IoT en el invernadero



Nota: Elaboración propia

Puesta en Funcionamiento del Sistema IoT. Luego de completar la instalación del sistema IoT, se procedió a ponerlo en marcha en marcha el sistema, las primeras lecturas del sistema IoT se muestran en la Figura M6, mientras que la Figura M7 presenta el dashboard con los registros de los sensores en tiempo real.

Al tratarse del mediodía, la temperatura dentro del invernadero alcanzó los 35 °C superando el umbral de 25 °C establecido. Por otro lado, la humedad del suelo registra una temperatura promedio de 36%, valor inferior al umbral

inferior del rango optimo de humedad del suelo.

Como resultado, el sistema IoT activó tanto el sistema de riego como el sistema de ventilación, tal como se observa en la Figura M7. Y en la Figura M8 se muestra el sistema de iluminación encendido durante la noche. Este comportamiento del sistema evidencia el funcionamiento adecuado del sistema.

Figura M6

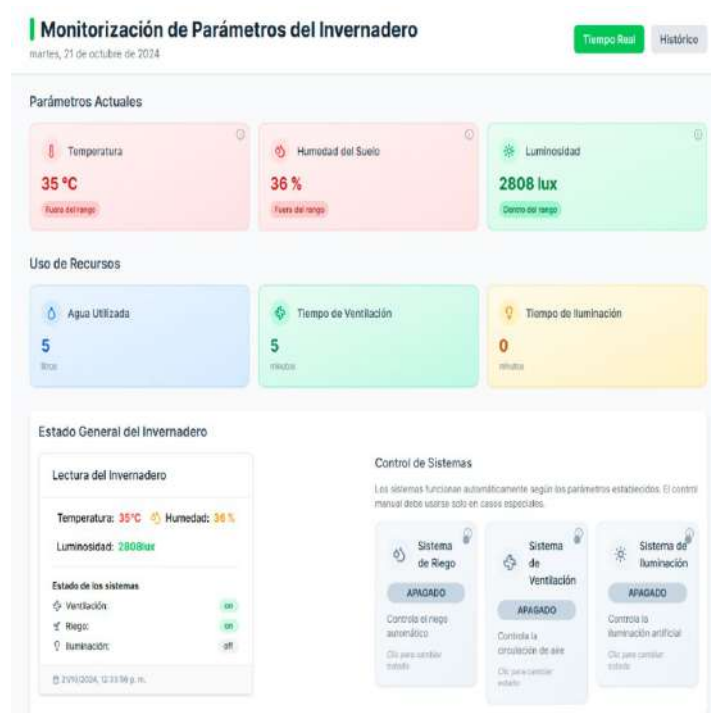
Primeros registros del sistema IoT



Nota: Elaboración propia.

Figura M7

Dashboard en funcionamiento



Nota: Elaboración propia

Figura M8

Activación del sistema de riego y ventilación



Nota: Elaboración propia

Figura M9

Sistema de iluminación encendido a las 7:15 p.m.



Nota: Elaboración propia

Anexo N:**Especificaciones Técnicas del Esp32-WROOM-32**

Table 1: ESP32-WROOM-32 Specifications

Categories	Items	Specifications
Certification	RF certification	See certificates for ESP32-WROOM-32
	Wi-Fi certification	Wi-Fi Alliance
	Bluetooth certification	BQB
	Green certification	RoHS/REACH
Test	Reliability	HTOL/HTSL/uHAST/TCT/ESD
Wi-Fi	Protocols	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps)
		A-MPDU and A-MSDU aggregation and 0.4 μ s guard interval support
	Center frequency range of operating channel	2412 ~ 2484 MHz
Bluetooth	Protocols	Bluetooth v4.2 BR/EDR and Bluetooth LE specification
	Radio	NZIF receiver with -97 dBm sensitivity
		Class-1, class-2 and class-3 transmitter
		AFH
	Audio	CVSD and SBC
Hardware	Module interfaces	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR, pulse counter, GPIO, capacitive touch sensor, ADC, DAC, Two-Wire Automotive Interface (TWAI®), compatible with ISO11898-1 (CAN Specification 2.0)
	Integrated crystal	40 MHz crystal
	Integrated SPI flash ¹	4 MB
	Operating voltage/Power supply	3.0 V ~ 3.6 V
	Operating current	Average: 80 mA
	Minimum current delivered by power supply	500 mA
	Recommended operating ambient temperature range	-40 °C ~ +85 °C
	Package size	18 mm × 25.5 mm × 3.10 mm

[Not Recommended For New Designs \(NRND\)](#)

Anexo O:**Especificaciones Técnicas del sensor de humedad del suelo FC-28****6 Specifications****6.1 Absolute Maximum Ratings**over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

			MIN	MAX	UNIT
Differential Input Voltage ⁽⁴⁾				36	V
Input Voltage			-0.3	36	V
Input Current (V _{IN} <-0.3 V) ⁽⁵⁾				50	mA
Power Dissipation ⁽⁶⁾	PDIP			780	mW
	TO-99			660	mW
	SOIC			510	mW
	DSBGA			568	mW
Output Short-Circuit to Ground ⁽⁷⁾				Continuous	
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)				260	°C
Soldering Information	PDIP Package Soldering (10 seconds)			260	°C
	SOIC Package	Vapor Phase (60 seconds)		215	°C
		Infrared (15 seconds)		220	°C
Storage temperature, T _{stg}			-65	150	°C

- (1) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage may occur. Recommended Operating Conditions indicate conditions for which the device is intended to be functional, but specific performance is not guaranteed. For guaranteed specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics.
- (2) Refer to RETS193AX for LM193AH military specifications and to RETS193X for LM193H military specifications.
- (3) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the TI Sales Office/Distributors for availability and specifications.
- (4) Positive excursions of input voltage may exceed the power supply level. As long as the other voltage remains within the common-mode range, the comparator will provide a proper output state. The low input voltage state must not be less than -0.3V (or 0.3V below the magnitude of the negative power supply, if used).
- (5) This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the comparators to go to the V^+ voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than -0.3V.
- (6) For operating at high temperatures, the LM393 and LM2903 must be derated based on a 125°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 170°C/W which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM193/LM193A/LM293 must be derated based on a 150°C maximum junction temperature. The low bias dissipation and the "ON-OFF" characteristic of the outputs keeps the chip dissipation very small ($P_D \leq 100$ mW), provided the output transistors are allowed to saturate.
- (7) Short circuits from the output to V^+ can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 20 mA independent of the magnitude of V^+ .

6.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
V_{ESD}	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	±1300	V

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

	MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply Voltage (V^+) - Single Supply	2.0		36	V
Supply Voltage (V^+) - Dual Supply	±1.0		±18	V
Operating Input Voltage on (V_{IN} pin)	0		(V^+) -1.5V	V
Operating junction temperature, T_J : LM193/LM193A	-55		125	°C
Operating junction temperature, T_J : LM2903	-40		85	°C
Operating junction temperature, T_J : LM293	-25		85	°C
Operating junction temperature, T_J : LM393	0		70	°C

Anexo P:**Especificaciones Técnicas del Sensor DHT22****Aosong Electronics Co.,Ltd**

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

1. Feature & Application:

- * Full range temperature compensated * Relative humidity and temperature measurement
- * Calibrated digital signal *Outstanding long-term stability *Extra components not needed
- * Long transmission distance * Low power consumption *4 pins packaged and fully interchangeable

2. Description:

DHT22 output calibrated digital signal. It utilizes exclusive digital-signal-collecting-technique and humidity sensing technology, assuring its reliability and stability. Its sensing elements is connected with 8-bit single-chip computer.

Every sensor of this model is temperature compensated and calibrated in accurate calibration chamber and the calibration-coefficient is saved in type of programme in OTP memory, when the sensor is detecting, it will cite coefficient from memory.

Small size & low consumption & long transmission distance(20m) enable DHT22 to be suited in all kinds of harsh application occasions.

Single-row packaged with four pins, making the connection very convenient.

3. Technical Specification:

Model	DHT22
Power supply	3.3-6V DC
Output signal	digital signal via single-bus
Sensing element	Polymer capacitor
Operating range	humidity 0-100%RH; temperature -40~80Celsius
Accuracy	humidity +2%RH(Max +5%RH); temperature <+-0.5Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH; temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +-1%RH; temperature +-0.2Celsius
Humidity hysteresis	+0.3%RH
Long-term Stability	+0.5%RH/year
Sensing period	Average: 2s
Interchangeability	fully interchangeable
Dimensions	small size 14*18*5.5mm; big size 22*28*5mm

Anexo Q:

Especificaciones Técnicas del Módulos Sensor BH1750

Ambient Light Sensor IC Series

Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC


BH1750FVI

No.09046EBT01

●Descriptions

BH1750FVI is an digital Ambient Light Sensor IC for I²C bus interface. This IC is the most suitable to obtain the ambient light data for adjusting LCD and Keypad backlight power of Mobile phone. It is possible to detect wide range at High resolution. (1 - 65535 lx).

●Features

- 1) I²C bus Interface (f / s Mode Support)
- 2) Spectral responsibility is approximately human eye response
- 3) Illuminance to Digital Converter
- 4) Wide range and High resolution. (1 - 65535 lx)
- 5) Low Current by power down function
- 6) 50Hz / 60Hz Light noise reject-function
- 7) 1.8V Logic input interface
- 8) No need any external parts
- 9) Light source dependency is little. (ex. Incandescent Lamp. Fluorescent Lamp. Halogen Lamp. White LED. Sun Light)
- 10) It is possible to select 2 type of I²C slave-address.
- 11) Adjustable measurement result for influence of optical window
(It is possible to detect min. 0.11 lx, max. 100000 lx by using this function.)
- 12) Small measurement variation (+/- 20%)
- 13) The influence of infrared is very small.

●Applications

Mobile phone, LCD TV, NOTE PC, Portable game machine, Digital camera, Digital video camera, Car navigation, PDA, LCD display

●Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limits	Units
Supply Voltage	V _{max}	4.5	V
Operating Temperature	T _{opr}	-40~85	°C
Storage Temperature	T _{stg}	-40~100	°C
SDA Sink Current	I _{max}	7	mA
Power Dissipation	P _d	260*	mW

* 70mm × 70mm × 1.6mm glass epoxy board. Derating is done at 3.47mW/°C for operating above Ta=25°C.

●Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units
V _{CC} Voltage	V _{CC}	2.4	3.0	3.6	V
I ² C Reference Voltage	V _{DVI}	1.65	-	V _{CC}	V

● Electrical Characteristics (Vcc = 3.0V, DVI = 3.0V, Ta = 25°C, unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Supply Current	Icc1	—	120	190	μA	Ev = 100 lx ^{*1}
Powerdown Current	Icc2	—	0.01	1.0	μA	No input Light
Peak Wave Length	λp	—	560	—	nm	
Measurement Accuracy	S/A	0.96	1.2	1.44	times	Sensor out / Actual lx EV = 1000 lx ^{*1, *2}
Dark (0 lx) Sensor out	S0	0	0	3	count	H-Resolution Mode ^{*3}
H-Resolution Mode Resolution	rHR	—	1	—	lx	
L-Resolution Mode Resolution	rLR	—	4	—	lx	
H-Resolution Mode Measurement Time	tHR	—	120	180	ms	
L-Resolution Mode Measurement Time	tLR	—	16	24	ms	
Incandescent / Fluorescent Sensor out ratio	rIF	—	1	—	times	EV = 1000 lx
ADDR Input 'H' Voltage	VAH	0.7 * VCC	—	—	V	
ADDR Input 'L' Voltage	VAL	—	—	0.3 * VCC	V	
DVI Input 'L' Voltage	VDVL	—	—	0.4	V	
SCL, SDA Input 'H' Voltage 1	VIH1	0.7 * DVI	—	—	V	DVI ≥ 1.8V
SCL, SDA Input 'H' Voltage 2	VIH2	1.26	—	—	V	1.65V ≤ DVI < 1.8V
SCL, SDA Input 'L' Voltage 1	VIL1	—	—	0.3 * DVI	V	DVI ≥ 1.8V
SCL, SDA Input 'L' Voltage 2	VIL2	—	—	DVI - 1.26	V	1.65V ≤ DVI < 1.8V
SCL, SDA, ADDR Input 'H' Current	IiH	—	—	10	μA	
SCL, SDA, ADDR Input 'L' Current	IiL	—	—	10	μA	
I ² C SCL Clock Frequency	fSCL	—	—	400	kHz	
I ² C Bus Free Time	tBUF	1.3	—	—	μs	
I ² C Hold Time (repeated) START Condition	tHSTA	0.6	—	—	μs	
I ² C Set up time for a Repeated START Condition	tSUSTA	0.6	—	—	μs	
I ² C Set up time for a Repeated STOP Condition	tSUSTD	0.6	—	—	μs	
I ² C Data Hold Time	tHDDAT	0	—	0.9	μs	
I ² C Data Setup Time	tSUDAT	100	—	—	ns	
I ² C 'L' Period of the SCL Clock	tLOW	1.3	—	—	μs	

Anexo R:

Especificaciones Técnica de la Válvula Selenoide 12VDC 1/2"

DESCRIPCIÓN

INFO

Controlar el flujo de agua en una tubería es ahora más sencillo con la ayuda de esta válvula selenoide. Las válvulas selenoides son un tipo de electroválvula todo/nada o abierto/cerrado. Tienen dos partes: el solenoide y el cuerpo de plástico.

El solenoide es un electroimán que al ser energizado se desplaza junto con el diafragma de la válvula y permite el paso del fluido. La válvula se mantiene abierta mientras el solenoide está energizado. Cuando no está alimentado un resorte se encarga de regresar la válvula a su posición de reposo, que en este caso es del tipo normalmente cerrada (NC).

El cuerpo de la válvula está fabricado en plástico con roscados machos a ambos lados de 1/2" tipo NPS (recta). La mayoría de tuberías utilizadas en los hogares latinoamericanos tienen un diámetro de 1/2", por lo que este modelo de válvula es ideal para controlar el flujo de agua en un hogar.

Controlar la válvula es muy sencillo con la ayuda de un microcontrolador y un driver de potencia. El uso del driver entre el microcontrolador y la válvula es necesario pues la corriente y voltaje de la válvula son mayores a los usados por el microcontrolador. Si conectamos directamente el microcontrolador a la válvula es seguro que dañaremos nuestro circuito. Los microcontroladores que podemos usar son: Arduino, Pic, Raspberry Pi o un Módulo ESP8266 ([Wemos](#), [NodeMCU](#)). En cuanto al driver de potencia recomendamos utilizar transistores mosfet como: [Módulo Mosfet IRF520](#) / [Módulo Mosfet IRF540](#) o los transistores TIP121, o los clásicos relay como el [Módulo Relay](#) de 1CH. Además podemos agregar a nuestro proyecto un protocolo de comunicación para el control a distancia, como: Wifi, RF, RS-485, Z-wave, etc y de esa forma manejar nuestro sistema desde el celular o internet.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Voltaje de operación: 12V DC
- Corriente de operación: 0.6A
- Potencia consumo: 8W
- Temperatura de funcionamiento: 5°C a 100°C
- Presión de funcionamiento mínima: 0.02 MPa (0.2 Bar = 2.04 mca)
- Presión de funcionamiento máximo: 0.8 MPa (8 Bar = 81.6 mca)
- Tiempo de respuesta (apertura): ≤ 0.15 s
- Tiempo de respuesta (cerrado): ≤ 0.3 s
- Conector tubería: Rosca externa 1/2" NPS Macho
- Reposo: Normalmente cerrado
- Tipo de válvula: Diafragma
- Adecuado para agua y fluidos de baja viscosidad
- No se recomienda para aplicaciones que usan solo la gravedad, por la presión mínima de funcionamiento
- Material cuerpo: Plástico ABS
- Dimensiones: 85*60*26 mm
- Peso:

APLICACIONES

- Domótica
- Automatización Industrial
- Riego automatizado
- Agricultura de precisión

Anexo S:

Modelos para Estructurar Base de Datos

```

1 import mongoose, { Document, Schema } from "mongoose";
2
3 interface IControlSettings {
4   intervaloMedicion: Number;
5   umbralTemperaturaAlta: Number;
6   umbralTemperaturaBaja: Number;
7   umbralHumedadAlta: Number;
8   umbralHumedadBaja: Number;
9   horaInicioLuz: String;
10  horaFinLuz: String;
11  dispositivo: String;
12  lastUpdated: String;
13 }
14
15 const ControlSettingsSchema: Schema = new Schema({
16   intervaloMedicion: { type: Number, default: 300 },
17   umbralTemperaturaAlta: { type: Number, default: 30 },
18   umbralTemperaturaBaja: { type: Number, default: 15 },
19   umbralHumedadAlta: { type: Number, default: 80 },
20   umbralHumedadBaja: { type: Number, default: 40 },
21   horaInicioLuz: String,
22   horaFinLuz: String,
23   lastUpdated: { type: Date, default: Date.now },
24 });

```

```

1 import mongoose, { Document, Schema } from "mongoose";
2
3 export interface IGreenhouseReadings {
4   temperature: Number;
5   humidity: Number[];
6   luminosity: Number;
7   water_consumed: Number;
8   water_rate: Number;
9   gas_concentration: Number;
10  watering_status: Boolean;
11  fan_status: Boolean;
12  light_status: Boolean;
13 }
14
15 const GreenhouseReadingsSchema: Schema = new Schema({
16   humidity: { type: Number, required: true },
17   temperature: { type: Number, required: true },
18   light: { type: Number, required: true },
19   soil_humidity: { type: Array },
20   fan_status: { type: String, enum: ["on", "off"], required: true },
21   irrigation_status: { type: String, enum: ["on", "off"], required: true },
22   light_status: { type: String, enum: ["on", "off"], required: true },
23   timestamp: { type: String, required: true },
24   createdAt: { type: Date, default: Date.now },
25   editedAt: { type: Date },
26   deletedAt: { type: Date },
27 });

```

```

1 import mongoose, { Schema } from "mongoose";
2
3 interface ILightingModel {
4   _id: string;
5   lighting_status: string;
6   start_time: Date;
7   end_time: Date;
8   lighting_duration: Number;
9   createdAt: Date;
10  editedAt: Date;
11  deletedAt: Date;
12 }
13
14 const LightingModelSchema: Schema = new Schema({
15   status: { type: String, enum: ["on", "off"], required: true },
16   light_id: { type: String, required: true },
17   start_time: { type: String, required: true },
18   end_time: { type: String },
19   duration: { type: Number, required: true },
20   createdAt: { type: Date, default: Date.now },
21   editedAt: { type: Date },
22   deletedAt: { type: Date },
23 });

```

```

1 import mongoose, { Schema } from "mongoose";
2
3 interface IVentilationModel {
4   _id: string;
5   ventilation_status: string;
6   start_time: Date;
7   end_time: Date;
8   ventilation_duration: Number;
9   createdAt: Date;
10  editedAt: Date;
11  deletedAt: Date;
12 }
13
14 const VentilationSchema: Schema = new Schema({
15   status: { type: String, enum: ["on", "off"], required: true },
16   ventilation_id: { type: String, required: true },
17   start_time: { type: String, required: true },
18   end_time: { type: String },
19   duration: { type: Number, required: true },
20   createdAt: { type: Date, default: Date.now },
21   editedAt: { type: Date },
22   deletedAt: { type: Date },
23 });

```

```

1 import mongoose, { Schema } from "mongoose";
2
3 interface IWateringModel {
4   _id: string;
5   watering_status: string;
6   start_time: Date;
7   end_time: Date;
8   watering_duration: Number;
9   amount_water_used: Number;
10  createdAt: Date;
11  editedAt: Date;
12  deletedAt: Date;
13 }
14
15 const WateringSchema: Schema = new Schema({
16   status: { type: String, enum: ["on", "off"] },
17   irrigation_id: { type: String, required: true },
18   start_time: { type: String, required: true },
19   end_time: { type: String || null, required: true },
20   duration: { type: Number, required: true },
21   consumption_liters: { type: Number || null, required: true },
22   createdAt: { type: Date, default: Date.now },
23   editedAt: { type: Date },
24   deletedAt: { type: Date },
25 });

```

Anexo T:

Código de envío de datos del Esp32 al backend

```

1 void enviarDatos() {
2   StaticJsonDocument<1024> doc;
3   JsonObject sensores = doc.createNestedObject("sensores");
4   JsonObject actuadores = doc.createNestedObject("actuadores");
5
6   // Datos de sensores
7   sensores["humedad"] = humedadRelativa;
8   sensores["temperatura"] = temperatura;
9   sensores["luz"] = luz;
10  sensores["humedad_suelo_1"] = humedadFC28Map_1;
11  sensores["humedad_suelo_2"] = humedadFC28Map_2;
12  sensores["humedad_suelo_3"] = humedadFC28Map_3;
13  sensores["humedad_suelo_4"] = humedadFC28Map_4;
14  sensores["humedad_suelo_5"] = humedadFC28Map_5;
15  sensores["status_ventilador"] = ventiladorActivo ? "on" : "off";
16  sensores["status_riego"] = riegoActivo ? "on" : "off";
17  sensores["status_luz"] = luzActiva ? "on" : "off";
18
19  // Riego
20  if (riegoId != "") { // Si hay un ID de riego guardado
21    JsonObject riego = actuadores.createNestedObject("riego");
22    riego["estado"] = riegoActivo ? "on" : "off";
23    riego["riego_id"] = riegoId;
24    riego["riego_start_time"] = riegoStartTime;
25    riego["riego_end_time"] = riegoEndTime;
26    riego["riego_duration"] =
27      riegoEndTime ? calculateTimeDifference(riegoStartTime, riegoEndTime) : 0;
28    riego["consumo_litros"] = consumoRiego; // Enviar el consumo total
29
30    // Reiniciar los valores solo si el riego ha terminado
31    if (!riegoActivo) {
32      riegoId = ""; // Reiniciar el ID
33    }
34  }
35
36  // Ventilador
37  if (ventiladorId != "") { // Si hay un ID de ventilador guardado
38    JsonObject ventilacion = actuadores.createNestedObject("ventilacion");
39    ventilacion["estado"] = ventiladorActivo ? "on" : "off";
40    ventilacion["ventilador_id"] = ventiladorId;
41    ventilacion["ventilador_start_time"] = ventiladorStartTime;
42    ventilacion["ventilador_end_time"] = ventiladorEndTime;
43    ventilacion["ventilador_duration"] =
44      ventiladorEndTime ? calculateTimeDifference(ventiladorStartTime, ventiladorEndTime) : 0;
45
46    // Reiniciar los valores solo si el ventilador ha terminado
47    if (!ventiladorActivo) {
48      ventiladorId = ""; // Reiniciar el ID
49    }
50  }
51
52  // Iluminación
53  if (luzId != "") { // Si hay un ID de iluminación guardado
54    JsonObject iluminacion = actuadores.createNestedObject("iluminacion");
55    iluminacion["estado"] = luzActiva ? "on" : "off";
56    iluminacion["luz_id"] = luzId;
57    iluminacion["luz_start_time"] = luzStartTime;
58    iluminacion["luz_end_time"] = luzEndTime;
59    iluminacion["luz_duration"] =
60      luzEndTime ? calculateTimeDifference(luzStartTime, luzEndTime) : 0;
61
62    // Reiniciar los valores solo si la iluminación ha terminado
63    if (!luzActiva) {
64      luzId = ""; // Reiniciar el ID
65    }
66  }
67
68  doc["timestamp"] = getFormattedTime();
69
70  // Serializar el objeto JSON a un String
71  String jsonString;
72  serializeJson(doc, jsonString);
73
74  enviarDatosHTTP(jsonString);
75 }

```

Anexo U:

Encuesta aplicada a los agricultores de la localidad de Taquia

Evaluación de la siembra de cebolla china en la localidad de Taquia

Evaluar los costos, ganancias y condiciones del cultivo tradicional de cebolla china, para compararlos con un modelo de cultivo en invernadero automatizado.

1. ¿Siembra cebolla china? *

- ☐ sí
- ☐ no

2. ¿Qué factores consideras importantes al decidir sembrar cebolla china? *

- ☐ Ciclo de cosecha breve
- ☐ Inversión económica y accesible
- ☐ Rendimiento económico exponencial
- ☐ Otras

3. ¿Cuál es la frecuencia anual de siembra de cebolla china en su cultivo? *

Considere que el cultivo se desarrolla en una misma parcela durante todo el ciclo agrícola.

- ☐ 1 a 3
- ☐ 4 a 5
- ☐ 6 a 7
- ☐ 8 a 9
- ☐ 10 a 11

4. ¿En qué estación climática prefiere sembrar cebolla china? *

- ☐ Estación lluviosa
- ☐ Estación seca
- ☐ Todo el año
- ☐ Se prioriza la siembra en épocas de lluvias, reservando ciclos menores para la estación seca con riego complementario.
- ☐ Otras

5. ¿Qué factores limitantes determinan la reducción de siembra en la estación seca? *

Escriba su respuesta

6. ¿Qué desafíos específicos le impiden sembrar fuera de la temporada de lluvias? *

Escriba su respuesta

7. ¿Cuál es el área promedio de una parcela? *

- ☐ 100 a 200 m²
- ☐ 200 a 300 m²
- ☐ 300 a 400 m²
- ☐ 400 a 500 m²
- ☐ Otras

8. ¿Cuántos kilos de cebolla son necesarios para cultivar una parcela promedio? *

- ☐ 10 a 15 Kg
- ☐ 15 a 20 Kg
- ☐ 20 a 25 Kg
- ☐ 25 a 30 Kg
- ☐ Otras

9. ¿Qué índice de multiplicación (kg producidos por kg de bulbo) obtiene en la cebolla china? *

- ☐ x 1.5
- ☐ x 2
- ☐ x 3
- ☐ x 4
- ☐ x 5
- ☐ x 6
- ☐ Otras

10. ¿Cuál es el costo promedio por una parcela promedio para cultivar cebolla china, incluyendo insumos, mano de obra? *

Escriba su respuesta

11. Según su experiencia, ¿Cuánto gana en promedio por parcela de cebolla china cosechada? *

Escriba su respuesta

12. ¿Cuál es el precio promedio de 1kg de cebolla china? *

Escriba su respuesta

13. ¿Cuáles son las mayores dificultades para sembrar cebolla china, teniendo en cuenta el clima, la calidad de la tierra y las plagas o enfermedades? *

- ☐ Falta de acceso equitativo al agua de riego durante los meses de sequía, afectando a los cultivos.
- ☐ Reducción crítica de las lluvias durante la temporada seca
- ☐ Enfermedades comunes que atacan a la cebolla china, como hongos en las raíces y hojas.
- ☐ La alta humedad ambiental y el encharcamiento del suelo en épocas de lluvias crean condiciones ideales para la proliferación de hongos
- ☐ Granizo, huaclos y otros desastres naturales que dañan cosechas
- ☐ Otras