



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO RASPBERRY PI Y ARDUINO DE CULTIVO
HIDROPÓNICO DE LECHUGAS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Rodrigo Alejandro Castillo Tojin

Asesorado por Ing. Kenneth Issur Estrada Ruíz

Guatemala, noviembre de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO RASPBERRY PI Y ARDUINO DE CULTIVO
HIDROPÓNICO DE LECHUGAS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

RODRIGO ALEJANDRO CASTILLO TOJIN

ASESORADO POR EL ING. KENNETH ISSUR ESTRADA RUÍZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Edgar Yanuario Laj Hun
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO RASPBERRY PI Y ARDUINO DE CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGAS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 22 de febrero de 2024.



Rodrigo Alejandro Castillo Tojin

Guatemala, 30 de julio de 2024

Ingeniero
Julio César Solares Peñate
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Su Despacho.

Estimado Ingeniero Solares Peñate:

Con atento saludo hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación titulado: **“DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO RASPBERRY PI Y ARDUINO DE CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGAS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA”**, trabajo realizado por el estudiante universitario **Rodrigo Alejandro Castillo Tojin, Registro Académico 201602781** y con Documento Personal de Identificación -DPI- con Código Único de Identificación -CUI- No. 3018 06691 0101 de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, el cual asesoré y doy por aprobado.

Por lo cual, tanto el autor como yo, en calidad de Asesor, nos hacemos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,


“Id y enseñad a todos”
Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
Asesor
Colegiado No. 6271

C.C. Archivo



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 6 de septiembre de 2024

Señor director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Señor director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación de EPS titulado **DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO RASPBERRY PI Y ARDUINO DE CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGAS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante **Rodrigo Alejandro Castillo Tojin**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A blue ink signature of the name "Ing. Julio César Solares Peñate" on a white background.

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

SIST.LNG.DIRECTOR.27.EIME.2024

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante Rodrigo Alejandro Castillo Tojin: DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO RASPBERRY PI Y ARDUINO DE CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGAS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, procede a la autorización del mismo.



The seal of the University of San Carlos of Guatemala, specifically the School of Mechanical Electrical Engineering, is positioned to the right of the signature. It is circular with the text "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA" at the top, "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA" in the center, and "FACULTAD DE INGENIERÍA" at the bottom.

Ingeniero Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Guatemala, noviembre de 2024

Decanato
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.737.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO RASPBERRY PI Y ARDUINO DE CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGAS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DOCENTE DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por: **Rodrigo Alejandro Castillo Tojin** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

Guatemala, noviembre de 2024



Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2024 Correlativo: 737 CUI: 3018066910101

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hídricos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mí guía y brindarme la sabiduría para concluir mi carrera.
Mi madre	Astrid Yojana Tojin Siguan, por todo el amor, apoyo y sobre todo, la paciencia. Este logro es para ti. Te amo.
Mi padre	Jorge Mario Álvarez Quirós, por esa figura paterna y brindarme siempre cariño y apoyo incondicional.
Mis abuelas	Carmen Siguan Vallejo (q. e. p. d.) y Raquel Mazariegos Quiñónez, por todo el amor que siempre me han dado y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.
Hermanas Aguilar Tojin	Melissa (q. e. p. d.) y Jimena, por ser como unas hermanas y ser una fuente de felicidad en mi vida, las extraño todos los días.
Mis tíos	José María Díaz, Axel Lemus, Erika y Krishnan Castillo Mazariegos, Corina, Amanda, Etelvina, Mariana, Josefina y Silvia, Ricardo, Samuel, Alfredo Tojin Sánchez, por su sabiduría, cariño pendientes de mí y brindarme su apoyo.

Mis primos

Frans y Antonio López Tojin, Diana y Karen Tojin Sánchez, Sergio, Sabrina y Fernando Vela Tojin, José Carlos y Mariana Borrero Tojin, Axel Lemus Tojin, Jessica, Melissa (q. e. p. d.) y Jimena Aguilar Tojin, Karla, Luisa Fernanda (q. e. p. d.), Alejandra, Laura y Samuel Tojin Talavera, Marco, Izabella y Paolo Tojin García, Andrea y Susan Velásquez Tojin, Diego López Conde y Mateo Herdicia Vela, Thais Castillo Mazariegos.

Mi novia

Débora Amézquita, por tu amor, apoyo, compañía y paciencia en esta etapa final de mi carrera. Gracias por celebrar este éxito conmigo.

AGRADECIMIENTOS A:

- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por ser la casa de estudios que abrió sus puertas hacia mí y que fue clave en mi desarrollo personal y académico
- Facultad de Ingeniería** Por brindarme las herramientas y el conocimiento para culminar mi carrera profesional.
- Facultad de Agronomía** Por permitirme desarrollar mi trabajo de graduación en sus instalaciones.
- Dr. Marvin Roberto Salguero Barahona** Decano de la Facultad de Agronomía, por el apoyo institucional brindado para materializar el presente trabajo de graduación.
- Mis asesores** Ing. Kenneth Estrada y Licda. Roxana Alvarado, por la guía, el apoyo y dedicación en el desarrollo y finalización de mi trabajo de graduación.
- Ing. Agr. Carlos Alberto Reynosa Corado** Por su conocimiento y su buena disposición durante el desarrollo del presente trabajo de graduación.

**Líneas de Transmisión
ETCEE-INDE**

Ing. Rodolfo Rodríguez, Ing. Mario Monzón, Jhonatan Florian, Susan Cruz, Noé Salguero, Nolberto España, Omar Servellón y Lidia Castellanos, por sus palabras de apoyo y motivación.

**Ing. Marco Antonio
Santizo Ruiz**

Por el apoyo recibido durante los últimos años de mi carrera.

Mis amigos

Alvaro Cáceres, Diego Cordón, Esteban Celis, Luis Monzón y Sebastián Fernández, por siempre estar presentes y darme su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
GLOSARIO	XIX
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1. Facultad de Agronomía	1
1.1.1. Marco histórico	1
1.1.2. Misión	2
1.1.3. Visión	3
1.1.4. Organigrama	4
1.2. Centro Experimental Docente de Agronomía	6
1.2.1. Historia	6
1.2.2. Descripción de la institución	6
1.2.3. Misión	7
1.2.4. Visión	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Hidroponía	9
2.1.1. Tipos de cultivos hidropónicos	10
2.1.1.1. Cultivos en agua	10
2.1.1.2. Cultivos en sustratos	10
2.1.2. Ventajas de la hidroponía	10

2.1.3.	Desventajas de la hidroponía	11
2.1.4.	Sustratos	12
2.1.5.	Solución nutritiva	12
2.1.5.1.	Nivel de ácidos o bases en una sustancia (pH)	13
2.1.5.2.	Conductividad eléctrica	13
2.1.5.3.	Oxígeno disuelto	13
2.1.5.4.	Temperatura.....	13
2.1.5.5.	Radiación solar.....	14
2.1.6.	Sistemas de riego hidropónicos	14
2.1.6.1.	Riego localizado por goteo	14
2.1.6.2.	Subirrigación	15
2.1.6.3.	NFT o recirculante.....	16
2.1.6.4.	Raíz flotante	16
2.1.6.5.	Aeropónico	17
2.2.	Lechuga	18
2.2.1.	Variedades de lechuga.....	18
2.2.1.1.	Romana.....	18
2.2.1.2.	Iceberg	19
2.2.1.3.	Canasta.....	20
2.2.1.4.	Lollo.....	21
2.2.1.5.	Lechuga mantequilla	21
2.2.1.6.	Lechuga Simpson.....	22
2.2.2.	Requerimientos nutricionales	23
2.2.3.	Enfermedades	24
2.2.3.1.	<i>Botrytis cinerea</i>	24
2.2.3.2.	<i>Bremia lactucae</i>	25
2.2.3.3.	Podredumbre blanca	26
2.2.3.4.	Virus mosaico de lechuga	27

2.2.4.	Plagas.....	28
2.2.4.1.	Trips.....	28
2.2.4.2.	Minadores de la lechuga.....	29
2.2.4.3.	Mosca blanca.....	30
2.2.4.4.	Pulgones.....	31
2.3.	Tarjetas de desarrollo.....	31
2.3.1.	Microcontrolador	32
2.3.1.1.	Arduino	32
2.3.1.1.1.	Arduino Uno.....	33
2.3.1.1.2.	Arduino Mega	35
2.3.1.1.3.	Arduino Nano.....	37
2.3.1.1.4.	Arduino Leonardo	38
2.3.1.2.	Puertos Arduino	40
2.3.1.3.	Sistema operativo	41
2.3.1.4.	Lenguajes de programación	41
2.3.1.5.	Módulos y sensores	41
2.3.2.	Raspberry Pi.....	42
2.3.2.1.	Raspberry Pi Pico Series.....	43
2.3.2.2.	Raspberry Pi 4	45
2.3.2.3.	Raspberry Pi Zero 2 W	46
2.3.2.4.	Raspberry Pi 3 Model Series	48
2.3.2.5.	Sistema operativo de la Raspberry Pi..	49
2.3.2.6.	Lenguajes de programación	50
2.3.2.7.	Módulos y sensores	50
2.3.3.	<i>Software</i> de simulación.....	52
2.3.3.1.	Tinkercard.....	53
2.3.4.	Transductores.....	53
2.3.5.	Motores.....	55
2.3.5.1.	Motores DC.....	55

2.3.5.2.	Motores AC	57
2.3.6.	Neumática	58
2.3.6.1.	Sistema neumático	59
2.3.6.2.	Compresor.....	59
2.3.6.2.1.	Compresores de desplazamiento positivo	61
2.3.6.2.2.	Compresores dinámicos	62
2.3.6.3.	Depósito de aire	62
2.3.6.4.	Sistema de filtro.....	63
2.3.6.5.	Válvula.....	64
2.3.6.5.1.	Válvula de control direccional	65
2.3.6.5.2.	Válvula de control de caudal	65
2.3.6.5.3.	Válvula de bloqueo.....	66
2.3.6.5.4.	Válvula de alivio de presión	66
2.3.6.5.5.	Válvula de seguridad....	67
2.3.6.5.6.	Electroválvula.....	67
2.3.6.6.	Cilindro neumático.....	68
2.3.7.	Componentes	69
2.3.7.1.	Pasivos.....	69
2.3.7.2.	Activos.....	70
3.	DIAGNÓSTICO.....	73
3.1.	Objetivo de la visita de campo	74
3.2.	Importancia de la evaluación del invernadero	74

3.2.1.	Infraestructura física	75
3.2.2.	Sistema de riego.....	81
3.2.3.	Condiciones ambientales.....	86
3.2.4.	Recursos disponibles.....	88
3.3.	Beneficio del diagnóstico	92
3.3.1.	Identificación de necesidades.....	92
4.	MARCO METODOLÓGICO	95
4.1.	Descripción.....	95
4.1.1.	Justificación	95
4.2.	Localización.....	96
4.2.1.	Descripción del lugar	97
4.2.2.	Consideraciones ambientales.....	98
4.3.	Delimitación del campo de estudio	99
4.3.1.	Alcance del proyecto	99
4.3.2.	Restricciones del proyecto.....	99
4.4.	Tipo de cultivo hidropónico	100
4.5.	Tipo de lechuga	102
4.6.	Materiales a utilizar.....	103
4.6.1.	Tubería PVC de 2" clase 100 PSI.....	103
4.6.2.	Microtubos para riego localizado	105
4.6.3.	Madera tratada	107
4.6.4.	Bomba de agua centrífuga	108
4.6.5.	Tubería PVC de 1/2" clase 100 PSI.....	109
4.6.6.	Filtro de agua.....	110
4.6.7.	Arduino Uno.....	111
4.6.8.	Raspberry Pi 3 Model B.....	113
4.6.9.	Módulo de reloj en tiempo real (RTC).....	115
4.6.10.	Pantalla LCD I2C	116

4.6.11.	Sensor de humedad y temperatura	117
4.6.12.	Módulo de relé 2CH	118
5.	DISEÑO PROPUESTO.....	121
5.1.	Diseño propuesto para el cultivo NFT de lechuga mantequilla.....	121
5.1.1.	Módulos hidropónicos	123
5.1.2.	Sistema de riego	125
5.2.	Diseño propuesto del sistema automatizado de control de bombas de agua en el entorno Arduino	125
5.2.1.	Esquema de funcionamiento	126
5.2.2.	Diagrama de flujo	127
5.2.3.	Diagrama de conexiones.....	130
5.2.4.	Descripción del código de programación de la Arduino Uno	131
5.2.5.	Código de programación	133
5.3.	Diseño propuesto de un sistema de monitoreo de variables climatológicas para el invernadero del CEDA en el entorno Raspberry Pi	135
5.3.1.	Esquema de funcionamiento	136
5.3.2.	Diagrama de flujo	137
5.3.3.	Diagrama de conexiones.....	139
5.3.4.	Descripción del código de programación de la Raspberry Pi 3.....	140
5.3.5.	Código de programación	142
6.	MANUAL DE INSTALACIÓN	145
6.1.	Materiales y herramientas	145
6.2.	Preparación del sitio de instalación.....	146

6.3.	Instalación de <i>hardware</i>	147
6.4.	Configuración de <i>software</i>	148
6.5.	Pruebas de funcionamiento	148
7.	MANUAL DE USUARIO	151
7.1.	Sistema automatizado de bombeo de agua	151
7.1.1.	Funcionamiento del sistema	151
7.1.2.	Instrucciones de operación	151
7.2.	Sistema de monitoreo de variables climatológicas	153
7.2.1.	Funcionamiento del sistema	153
7.2.2.	Instrucciones de operación	154
8.	MANUAL DE MANTENIMIENTO	155
8.1.	Mantenimiento preventivo.....	155
8.2.	Pruebas de funcionamiento	156
8.3.	Solución de problemas	156
CONCLUSIONES		157
RECOMENDACIONES.....		159
REFERENCIAS		161

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Organigrama de la Facultad de Agronomía USAC	5
Figura 2.	Cultivo hidropónico	9
Figura 3.	Sistema de riego por goteo.....	15
Figura 4.	Sistema por subirrigación	15
Figura 5.	Sistema hidropónico NFT	16
Figura 6.	Sistema hidropónico por raíz flotante	17
Figura 7.	Sistema hidropónico por aeroponía	17
Figura 8.	Lechuga Romana	19
Figura 9.	Lechuga Iceberg	20
Figura 10.	Lechuga canasta	20
Figura 11.	Lechuga Lollo ..	21
Figura 12.	Lechuga mantequilla.....	22
Figura 13.	Lechuga Simpson	22
Figura 14.	Botrytis cinerea en lechuga	25
Figura 15.	Bremia lactucae	26
Figura 16.	Podredumbre blanca.....	27
Figura 17.	Virus mosaico de lechuga.....	28
Figura 18.	Trips	29
Figura 19.	Minadores de lechuga.....	30
Figura 20.	Mosca blanca...	30
Figura 21.	Pulgones.....	31
Figura 22.	Arduino Uno Rev3	35
Figura 23.	Arduino Mega 2560 Rev3	36

Figura 24.	Arduino Nano	38
Figura 25.	Arduino Leonardo	39
Figura 26.	Raspberry Pi Pico Series.....	44
Figura 27.	Raspberry Pi 4	46
Figura 28.	Raspberry Pi Zero 2 W	47
Figura 29.	Raspberry Pi Model 3 Series.....	49
Figura 30.	Visita al Centro Experimental Docente	73
Figura 31.	Visita el Invernadero.....	74
Figura 32.	Frente del invernadero	75
Figura 33.	Vista lateral del invernadero	76
Figura 34.	Sarán para disminución de insolación dentro del invernadero	76
Figura 35.	Sección de cultivo tradicional	77
Figura 36.	Sección de cultivo hidropónico	78
Figura 37.	Agujero en el techo del invernadero	79
Figura 38.	Malla antiáfidos	80
Figura 39.	Daño en la malla antiáfidos	80
Figura 40.	Reservorio tipo pileta.....	81
Figura 41.	Sistema de riego dentro del invernadero.....	82
Figura 42.	Filtro de agua	82
Figura 43.	Tinacos para realizar mezclas fertilizantes.....	83
Figura 44.	Bomba de agua	83
Figura 45.	Tablero de mando de las bombas de agua	84
Figura 46.	Tablero de contactores.....	85
Figura 47.	Interior de tinacos para realizar mezclas fertilizantes	86
Figura 48.	Estación meteorológica	87
Figura 49.	Conductor fuera el invernadero	88
Figura 50.	Tablero secundario en la bodega de materiales.....	89
Figura 51.	Tablero de distribución principal.....	89
Figura 52.	Conductor enrollado en árbol	90

Figura 53.	Oxido y sarro en las conexiones del tablero secundario.....	91
Figura 54.	Contador asignado al invernadero.....	91
Figura 55.	Localización CEDA, Facultad de Agronomía.....	97
Figura 56.	Descripción de la ubicación del CEDA.....	98
Figura 57.	Cultivo NFT de lechuga	101
Figura 58.	Lechuga mantequilla.....	103
Figura 59.	Tubería PVC 2" clase 100 PSI	105
Figura 60.	Microtubo de 6 mm	106
Figura 61.	Madera tratada	107
Figura 62.	Bomba de agua centrífuga.....	109
Figura 63.	Tubería PVC de 1/2" de clase 100 PSI	110
Figura 64.	Filtro de sedimentos.....	111
Figura 65.	Arduino Uno	113
Figura 66.	Raspberry Pi 3 Model B	114
Figura 67.	Módulo DS3231 RTC.....	115
Figura 68.	Pantalla LCD I2C	116
Figura 69.	Sensor DHT11	118
Figura 70.	Módulo de relé 2 CH.....	119
Figura 71.	Distribución de espacios actuales en el invernadero	122
Figura 72.	Propuesta de distribución de módulos hidropónicos.....	123
Figura 73.	Diseño de módulos hidropónicos.....	124
Figura 74.	Diseño del sistema de riego.....	125
Figura 75.	Diagrama de flujo del sistema automatizado de control de bombas de agua	129
Figura 76.	Diagrama del circuito de Arduino	131
Figura 77.	Diagrama de flujo del sistema de monitoreo de las condiciones climatológicas	138
Figura 78.	Diagrama del circuito de Raspberry Pi 3.....	140

TABLAS

Tabla 1.	Rangos de deficiencia, suficiencia y toxicidad de nutrientes en hoja de lechuga	23
Tabla 2.	Especificaciones técnicas Arduino Uno Rev3	34
Tabla 3.	Especificaciones técnicas Arduino Mega 2560 Rev3	35
Tabla 4.	Especificaciones técnicas Arduino Nano	37
Tabla 5.	Especificaciones técnicas Arduino Leonardo	38
Tabla 6.	Especificaciones técnicas Raspberry Pi Pico y Pico W	44
Tabla 7.	Especificaciones técnicas Raspberry Pi 4	45
Tabla 8.	Especificaciones técnicas Raspberry Pi Zero 2 W	47
Tabla 9.	Especificaciones técnicas Raspberry Pi 3 Model Series	48
Tabla 10.	Tipos de transductores	54
Tabla 11.	Especificaciones técnicas tubería PVC 2"	104
Tabla 12.	Especificaciones técnicas microtubos de 6mm	106
Tabla 13.	Especificaciones técnicas madera tratada	107
Tabla 14.	Especificaciones técnicas bomba de agua centrífuga	108
Tabla 15.	Tubería PVC de 1/2" clase 100 PSI.....	109
Tabla 16.	Especificaciones técnicas filtro de sedimentos.....	110
Tabla 17.	Características técnicas Arduino Uno.....	112
Tabla 18.	Características técnicas Raspberry Pi 3Model B.....	113
Tabla 19.	Especificaciones técnicas Módulo DS3231 RTC.....	115
Tabla 20.	Especificaciones técnicas pantalla LCD I2C	116
Tabla 21.	Especificaciones básicas sensor DHT11.....	117
Tabla 22.	Especificaciones técnicas del módulo de relé 2CH	118
Tabla 23.	Conexiones para el sistema de bombas automatizado en Arduino	130
Tabla 24.	Conexiones para el sistema de monitoreo de condiciones climatológicas en Rasberry PI	139

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CC	Corriente continua
°C	Grados Celsius
>	Mayor que
MHz	Mega Hertz
<	Menor que
Mg/L	Miligramos/Litro
RS	Rango de suficiencia
S/cm	Siemens/centímetro

GLOSARIO

ADC	Convertidor analógico digital.
Apiario o colmenar	Conjunto de colmenas.
EEPROM	ROM programable y borrible fácilmente.
Ethernet	Tecnología tradicional para conectar dispositivos en una red de área local.
Hardware	Partes físicas, tangibles, de un sistema informático, sus componentes eléctricos, electrónicos y electromecánicos.
Herbicidas	Productos químicos que destruyen plantas herbáceas.
ICSP	Programación serial en circuito.
Insecticidas	Productos químicos que sirven para matar insectos.
Leguminosas	Son plantas de las que se cosechan legumbres, fruto formado por una vaina que encierra en su interior una semilla.

Macos	Es la versión del sistema operativo para ordenadores Macintosh.
Nebulización	Proceso por el cual se mezcla un líquido con un gas a alta presión para la transmisión óptima del mismo.
Orquideario	Jardín botánico especializado en el cultivo, preservación y exposición de orquídeas.
Pesticidas	Sustancia que se emplea para combatir plagas.
PWM	Modulación por ancho de pulso.
RAM	Es la memoria de acceso aleatoria; memoria de la computadora que almacena la información que un programa necesita mientras se ejecuta.
ROM	Es la memoria solo de lectura; es el medio de almacenamiento que se usa en los ordenadores y dispositivos.
Roseta	Disposición circular en las hojas que todas se encuentran a la misma altura.
Sistema embebido	Es un sistema de computación diseñado para realizar funciones específicas, cuyos componentes se encuentran integrados en una placa base.

Software	Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.
Software libre	Aquel que da a los usuarios libertad de ejecutar, copiar, estudiar modificar y distribuir el <i>software</i> .
UART	Receptor/transmisor asíncrono universal, define un protocolo o conjunto de reglas para intercambiar datos en serie entre dos dispositivos.
USB	Toma de conexión universal de uso frecuente en las computadoras y otros dispositivos electrónicos.
Wi-Fi	Contracción del término en inglés Wireless Fidelity, o fidelidad inalámbrica; es una tecnología de redes inalámbrica que permite a los dispositivos electrónicos conectarse entre sí de manera fluida a una red mediante frecuencias de radio.
Windows	Es el sistema operativo insignia de Microsoft, estándar de facto para las computadoras domésticas y de negocios.

RESUMEN

La elaboración de este proyecto de graduación se centra en el diseño de un sistema de automatización de un cultivo hidropónico NFT de lechuga (*Latuca sativa*) Simpson embebido en los entornos Raspberry Pi y Arduino en el invernadero del Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Tiene como objetivo proponer el diseño de un cultivo hidropónico NFT de seis módulos en un espacio de 10x24 metros y los diseños del sistema de bombeo de agua y solución nutritiva con temporizador automático y el de un sistema de monitoreo de las variables climatológicas dentro del invernadero.

El desarrollo de este trabajo de investigación contribuye al campo de la agricultura de precisión y ofrece una base para futuras investigaciones respecto a la automatización de cultivos hidropónicos, tomando en cuenta el deseo actual de optimizar la utilización de recursos en agricultura moderna frente a los desafíos del cambio climático y la creciente demanda de alimentos.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema embebido Raspberry Pi y Arduino de cultivo hidropónico de lechugas en el Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Específicos

1. Identificar el tipo de sistema hidropónico que se desea automatizar de acuerdo a sus parámetros técnicos y de infraestructura para implementar un sistema embebido.
2. Determinar los componentes electrónicos que mejor se adapten para construir el sistema automatización de acuerdo a las variables a parametrizar.
3. Elaborar el diseño y los sistemas de conexión del sistema de automatización en los entornos Raspberry Pi y Arduino.
4. Desarrollar manuales de instalación, operación y mantenimiento del sistema de automatización propuesto.

INTRODUCCIÓN

Debido a que en la actualidad está aumentando considerablemente la demanda de alimentos más saludables y frescos, los recursos naturales utilizados para su producción se están viendo limitados con el paso del tiempo, surgió la necesidad de buscar nuevas soluciones que sean sostenibles para la producción agrícola y seguridad alimentaria.

En este aspecto, los cultivos hidropónicos surgen como respuesta para abordar la problemática actual del sector agrícola. Estos cuentan con varias ventajas respecto a los métodos convencionales, además de ser considerados renovables. No obstante, para el máximo aprovechamiento de sus beneficios, es necesaria la implementación de sistemas automatizados que permiten el control eficiente y preciso del entorno en el que crecen las plantas.

La automatización de un cultivo hidropónico conlleva la implicación de sistemas de control y monitoreo de los aspectos del entorno del crecimiento de las plantas. Para lograrlo, es necesario tener un sistema de bombeo de agua con temporizador automatizado y el monitoreo de las condiciones climáticas del entorno. Al implementar estos procesos se mejora la eficiencia de operación y garantiza mejor calidad de los cultivos.

El presente trabajo de graduación pretende desarrollar el sistema de automatización de un cultivo hidropónico de lechugas por medio de las tecnologías Raspberry Pi y Arduino en el Centro Experimental Docente de Agronomía -CEDA- de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala y pretende ser un apoyo tanto para el docente como para

el estudiante de la carrera de Sistemas de Producción Agrícola, así como para la implementación de futuros cultivos hidropónicos con sus respectivos sistemas de automatización.

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Facultad de Agronomía

La Facultad de Agronomía es una de las 10 Facultades que tiene la Universidad de San Carlos de Guatemala y está ubicada en la Ciudad Universitaria, zona 12 de la Ciudad de Guatemala. Administra las carreras de Sistemas de Producción Agrícola, Recursos Naturales Renovables, Industrias Agropecuarias y Forestales – IIAF – y Gestión Ambiental Local.

1.1.1. Marco histórico

La Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos se fundó en el año de 1950, teniendo cinco planes de estudio que han ido sufriendo cambios debido a la transición tanto de la Facultad como de la Universidad.

Fue en el año 1969 cuando se dio el primer cambio significativo en que el pensum de estudios de la Carrera de Ingeniero Agrónomo se orientó en las especialidades de Fitotecnia, Zootecnia, Ingeniería Agrícola y Socioeconomía. Fue en el año 1971 donde se inició el Ejercicio Profesional Supervisado – EPS – y en el año 1980 donde se aprobó un nuevo plan de estudios en donde se establecieron dos carreras: Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola e Ingeniero Agrónomo en Recursos Renovables.

Derivado a la evaluación del plan de estudios suscitada en 1993, se aprueba un nuevo plan de estudios en el año 1998, que resultó en algo innovador, pues tuvo como finalidad formar profesionales que se acoplaran ante

los cambios de oferta y demanda de la época, que fueran capaces de dominar e integrar nueva tecnología para sistemas de producción y la creación de empleos que provocarán desarrollo al país, así como soluciones alternativas y viables para resolver problemáticas agro nacionales. Fue por este Plan de Estudios que se implementaron los Módulos de Experiencias Prácticas – MEP –

El último cambio en los programas académicos de la Facultad de Agronomía se dio en las administraciones del Ing. Agr. M. Sc. Edgar Franco y del Dr. Ariel Ortiz, siendo este el Plan de Estudios 2008 con la que la Facultad de Agronomía adecuando sus planes de estudio a las necesidades nacionales y regionales siendo la primera unidad académica de Guatemala con acreditación internacional.

1.1.2. Misión

La Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, formas profesionales líderes y de calidad a nivel de técnico universitario, grado y postgrado, con compromiso social, éticos, íntegros, responsables, con comprensión del entorno, alta capacidad técnica, científica y de trabajo en equipo.

Contribuye con el desarrollo nacional y regional generando servicios de excelencia por medio de sus programas de investigación y extensión; lo que propicia el avance de los procesos de producción agrícola y forestal, el desarrollo rural, las ciencias de la tierra, los recursos naturales renovables y el ambiente.

Para el cumplimiento de sus funciones, cuenta con personal altamente calificado, tecnología apropiada y avanzada y desarrolla procesos de alta formación académica e investigación con rigor científico.

La Facultad de Agronomía tiene la finalidad de formar profesionales de alta capacidad y con compromisos sociales, éticos e íntegros con aptitud para acoplarse ante los cambios de la sociedad a nivel nacional e internacional y con liderazgo y alta preparación, contribuir con el desarrollo del país y de la región.

1.1.3. Visión

Para el año 2022, la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, es la unidad académica responsable de la educación superior en los niveles de técnico universitario, grado y postgrado, los cuales se imparten con calidad educativa y pertinencia académica.

Por medio de sus procesos académicos forma a sus profesionales en agronomía, con conciencia social, en procesos de transformación de productos agrícolas, en desarrollo rural, en las ciencias de la tierra, en los recursos naturales renovables y el ambiente, quienes se desempeñan con valores éticos, integridad, responsabilidad, solidaridad e identidad. Para lo cual ha articulado eficazmente las funciones de investigación, docencia y extensión, impulsando la actualización permanente de la curricula, incorporando los avances científicos tecnológicos de los pensum de estudio. Contribuye a la transformación social, aportando propuestas de solución a las necesidades del desarrollo nacional y regional en los campos de la agronomía, los recursos naturales y el ambiente, implementando programas de investigación y extensión que permiten la formulación de políticas públicas y leyes que propicien el uso sostenible de los

recursos naturales renovables y el desarrollo rural que sustenten un modelo de desarrollo nacional alternativo.

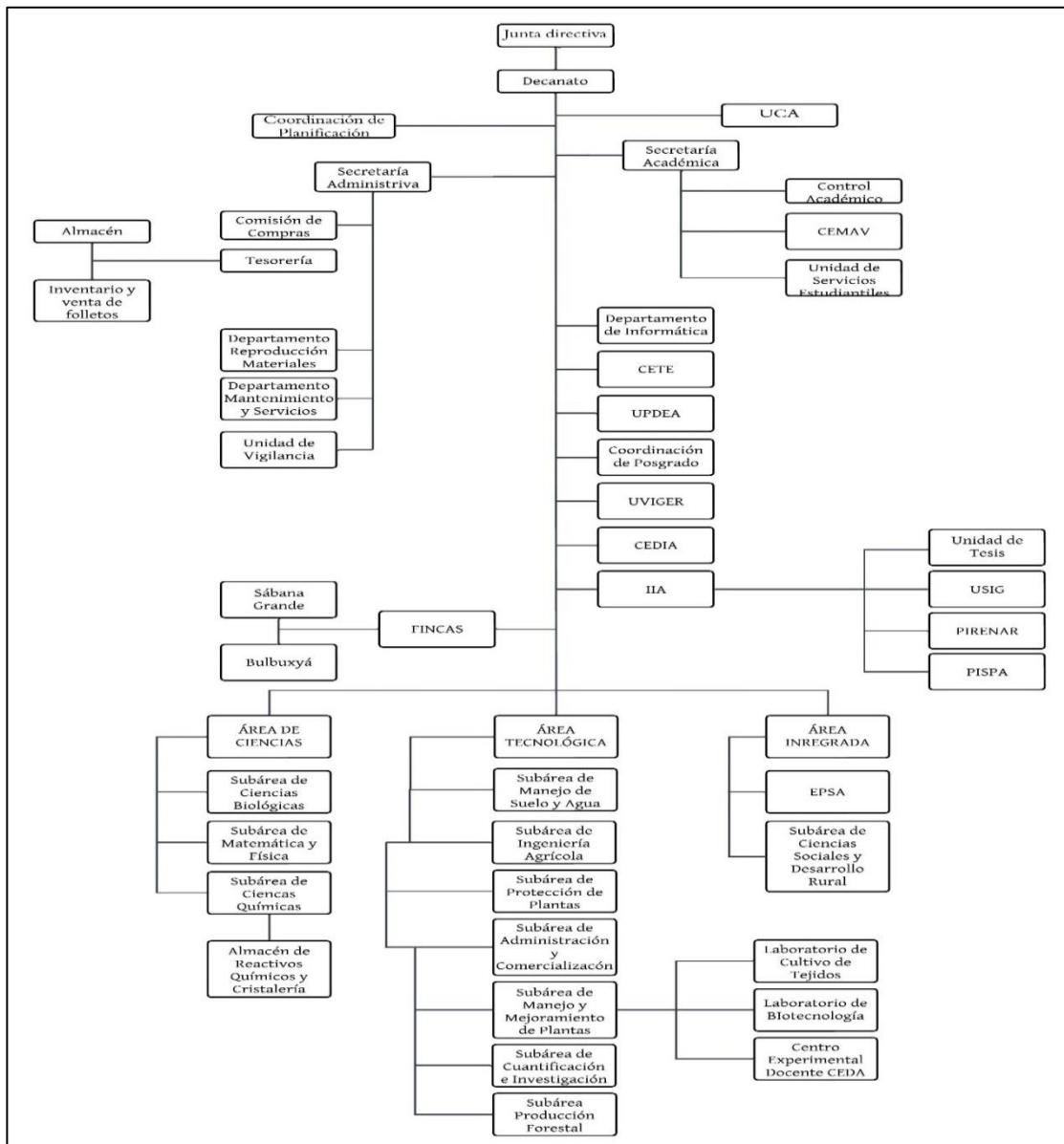
La Facultad de Agronomía buscar ser siempre líder a nivel técnico de grado y posgrado, a través de la formación de profesionales con conciencia social, ética, solidaridad y, con la ayuda de un plan de estudios adecuado y actualizado, contribuir a la solución de las necesidades que permitan el desarrollo nacional y regional en los campos de agronomía.

1.1.4. Organigrama

El presente organigrama, representa los niveles jerárquicos de la Facultad de Agronomía, siendo la máxima autoridad la Junta Directiva que, de la mano de la Decanatura se encargan de la administración de dicha Facultad.

Figura 1.

Organigrama de la Facultad de Agronomía USAC



Nota. Representación de los niveles jerárquicos de la Facultad de Agronomía. Obtenido de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. (2023). *Información primer ingreso*. (<http://nuevos.fausac.gt/wp-content/uploads/2020/03/Informacion-primer-ingreso.pdf>), consultado el 10 de febrero del 2024. De dominio público

1.2. Centro Experimental Docente de Agronomía

El Centro Experimental Docente de Agronomía – CEDA –, es el lugar en que se realizan pruebas y prácticas de campo como fisiología vegetal, filogenética, mejoramiento de semillas, entre otros, los cuales están dirigidos por estudiantes y supervisados por los docentes de los distintos cursos de estudio.

1.2.1. Historia

En el segundo semestre del año 1984 fue fundado el Centro Experimental Docente de Agronomía – CEDA –, en la administración del Ing. Agr. César Castañeda, durante la cual los profesores que iniciaron la implementación del Centro sembraron gran cantidad de trigo para establecer el grado de fertilidad del suelo. Más adelante, se delimitó el caminamiento para el paso de maquinaria y, en 1994, se construyó el pozo para suministro de agua de riego en la administración del Ing. Agr. Efraín Medina.

1.2.2. Descripción de la institución

Las instalaciones del CEDA se utilizan para docencia, investigación, producción y extensión. Dentro de él, los terrenos se distribuyen de la siguiente forma: un área para la investigación de invernaderos, producción de hortalizas, módulos, producción de granos básicos, agricultura orgánicas, fajas de conservación de suelos, leguminosas nativas, área de plantas medicinales, áreas de invernaderos para producción, área de vivero forestal, orquideario, apíario, área de plantas ornamentales, área estación meteorológica, área de bodegas, estacionamientos y parqueo para buses de la Facultad de Agronomía.

Además, posee una colección de árboles con distintas especies como *Pinus maximinoii*, *Pinis Oocarpa*, *Cupressus lusitanica*, entre otros.

1.2.3. Misión

Centro Experimental Docente de Agronomía –CEDA-, es una dependencia vinculada a la Facultad de Agronomía al servicio de la academia, el cual busca promover la investigación y extensión en el proceso de enseñanza y aprendizaje de los programas académicos de la facultad; proporcionando la infraestructura, recursos y medios necesarios para la adquisición de habilidades prácticas por parte de los estudiantes, donde se aborde la problemática del sector Agrícola, Forestal y Ambiental enfocada a la problemática nacional, así como lograr la vinculación de la Universidad al sector externo mediante actividades de extensión.

El CEDA es un espacio que pertenece a la Facultad de Agronomía, busca apoyar al estudiante en la investigación y extensión, proporcionando infraestructura y recursos para abordar problemáticas en los sectores agrícolas nacionales.

1.2.4. Visión

Ser un centro de formación académica con innovación tecnológica aplicado en los diferentes cultivos bajo invernadero y campo para la enseñanza de los profesores en los cursos y módulos que sirve la Facultad de Agronomía en sus programas de estudio; la generación de conocimiento y propiciar la interacción agrícola con sus diferentes actores. Que ayude al aprendizaje del estudiante, la adquisición de habilidades prácticas y al desarrollo de la

investigación, y el fomento de los procesos agroindustriales pertinente al contexto agrícola, forestal y ambiental.

El CEDA aspira a ser un centro que apoye a los estudiantes en su formación académica a través de tecnologías innovadoras de cultivo tanto en campo, como en invernaderos, y con ello, apoyar a la Facultad de Agronomía a mejorar la calidad del aprendizaje obtenido, respecto a los procesos agroindustriales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Hidroponía

Se conoce como hidroponía al método de cultivo de plantas que no utiliza suelo agrícola, sino que soluciones minerales. Las raíces de las plantas reciben estas soluciones disueltas en agua, denominadas soluciones nutritivas, las cuales están llenas de los nutrientes necesarios para el crecimiento sano de las plantas.

Debido a que la absorción de nutrientes en las plantas se da por medio de iones inorgánicos disueltos en agua, el suelo no es esencial para el desarrollo de las plantas. Por esta razón, la mayoría de las plantas terrestres pueden crecer con hidroponía.

Figura 2.

Cultivo hidropónico



Nota. Cultivo hidropónico NFT (Nutrient Film Technique). Obtenido de Agronotips (2020). *Cultivo Hidropónico.* (<https://www.portalfruticola.com/noticias/2020/12/02/como-construir-un-sistema-de-hidroponia-nft-casero/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.1.1. Tipos de cultivos hidropónicos

Existen distintos tipos de cultivos hidropónicos los cuales se clasifican de acuerdo al medio físico por el cual las plantas reciben la solución nutritiva:

2.1.1.1. Cultivos en agua

En este tipo de cultivos, las raíces de las plantas siempre están en contacto con agua en la que previamente fueron disueltos los minerales. El agua tiene que estar en constante movimiento para su oxigenación y evitar que las plantas mueran.

2.1.1.2. Cultivos en sustratos

En estos cultivos las plantas reposan en un material inerte libre de nutrientes, que es el sustrato. Este ayuda a fijar la raíz de la planta y es donde el agua y los nutrientes circulan siempre en contacto con las raíces. El sustrato debe almacenar aire y humedad y además debe tener un buen drenaje para el exceso de agua.

2.1.2. Ventajas de la hidroponía

Algunas de las ventajas de los cultivos hidropónicos son:

- Mayor productividad y rendimiento: el crecimiento de las plantas es dos veces más rápido y se produce hasta 10 veces más la cantidad de alimentos en el mismo espacio que requiere la agricultura con suelo agrícola.

- No pesticidas ni herbicidas: al no estar en el suelo, las hierbas malas o insectos no son amenazas para los cultivos.
- Reducido consumo de agua: debido a que el agua recircula y se reutiliza su consumo es considerablemente menor que en los cultivos convencionales.
- Menor contaminación: debido a que no se utilizan pesticidas, herbicidas o fertilizantes no se contamina suelo y tampoco se contamina el agua.
- Mayor adaptabilidad: el cultivo en entornos hostiles es posible por los viveros.

2.1.3. Desventajas de la hidroponía

A pesar de ser un muy buen método para el cultivo de plantas, la hidroponía presenta ciertas desventajas como:

- Elevado coste inicial: debido al montaje de todo lo necesario para el cultivo, su coste es mayor que el de los sistemas convencionales.
- Presencia de microorganismos: debido a la ausencia de tierra, microorganismos como bacterias o moho pueden contaminar el agua y provocar enfermedades en las plantas.
- Monitoreo constante: se necesitan sistemas de control para el constante monitoreo de niveles de temperatura, el riego, los nutrientes en el agua, entre otros.

2.1.4. Sustratos

Como sustituto del suelo para la fijación de las plantas, se utilizan medios sólidos inertes que básicamente deben cumplir con dos características principales:

- Sujetar las raíces para protegerlas de la luz y permitirlas respirar.
- Contener los nutrientes y el agua que las plantas necesitan.

Es considerado un buen sustrato aquel que permite entre 15 y 35 % de presencia de oxígeno y entre 20 y 60 % de agua en relación al total. En ocasiones resulta útil combinar sustratos para buscar complementarse entre sí. Para ello hay que tener en cuenta ciertas consideraciones:

- Retención de humedad
- Alto porcentaje de aireación
- Estable físicamente
- Inerte químicamente
- Inerte biológicamente
- Excelente drenaje
- Que posea buena capilaridad
- Liviano
- De bajo costo
- Alta disponibilidad.

2.1.5. Solución nutritiva

Una solución nutritiva es una mezcla de agua, oxígeno y una concentración conocida de nutrientes esenciales disueltos en forma iónica y

compuestos orgánicos como el quelato de hierro. Pueden utilizarse en cualquier sistema de producción agrícola, desde aplicaciones de suelo, hasta la hidroponía. De acuerdo al tipo de cultivo la concentración de nutrientes puede variar.

2.1.5.1. Nivel de ácidos o bases en una sustancia (pH)

Parámetro que para cultivos hidropónicos en general debe rondar entre 5,5 a 6,5, esto porque el pH mantiene los iones de los nutrientes solubles, favoreciendo en la absorción de los mismos a las raíces de la planta.

2.1.5.2. Conductividad eléctrica

Es el parámetro que mide la cantidad de nutrientes en la solución nutritiva; en hidroponía, su valor debe estar en el rango de 1,5 – 2,6 mili Siemens/centímetro dependiendo del tipo de cultivo.

2.1.5.3. Oxígeno disuelto

Mide la cantidad de oxígeno en la solución nutritiva, la cual es necesaria mantener oxigenada ya que permite a las plantas producir energía para su desarrollo. Su valor debe ser mayor a 5 miligramos/litro.

2.1.5.4. Temperatura

La temperatura influye en el crecimiento de las plantas, así como en la concentración de oxígeno, por lo que debe mantenerse controlada. En verano

se esperan valores entre 18 a 25 grados centígrados y en invierno entre 10 y 16 °C.

2.1.5.5. Radiación solar

La radiación solar es esencial para el crecimiento de las plantas, pero debe ser gestionado cuidadosamente para evitar problemas relacionados con la temperatura, evaporación y el equilibrio de nutrientes de la solución nutritiva.

2.1.6. Sistemas de riego hidropónicos

Existen distintos tipos de sistemas de riego hidropónicos y la clasificación de ellos se da de acuerdo a la forma en que la solución nutritiva entra en contacto con la raíz de los cultivos. Esta puede ser a través de un sustrato, por medio del aire o bien por medio de la circulación de dicha solución.

2.1.6.1. Riego localizado por goteo

Una bomba de agua activada con temporizador hace que la solución nutritiva gotee sobre las raíces de la planta. En algunos casos, es posible recuperar la solución nutritiva para reutilizarla mientras que en otros es desecharla.

Figura 3.

Sistema de riego por goteo



Nota. Representación gráfica de un sistema por goteo. Obtenido de Generación Verde (2007).

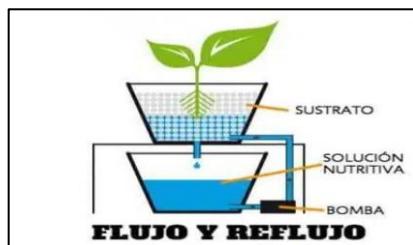
Sistema hidropónico por goteo. (<https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>). Consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.1.6.2. Subirrigación

También llamado de flujo y reflujo, en este sistema una bomba hace fluir, hasta inundar el recipiente donde se encuentran las raíces de la planta, solución nutritiva, la cual se drena y regresa a un depósito. Este proceso se repite varias veces durante el día por lo que la bomba debe estar en impecable estado.

Figura 4.

Sistema por subirrigación



Nota. Representación gráfica de un cultivo de flujo y reflujo. Obtenido de Generación Verde (2007).

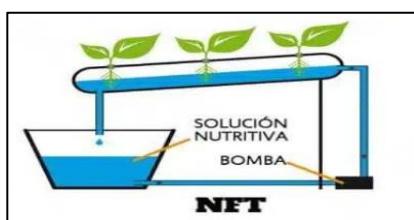
Sistema hidropónico por goteo. (<https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>). Consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.1.6.3. NFT o recirculante

Nutrient Film Technique, es un método de cultivo en que la solución nutritiva se distribuye a las raíces mediante un flujo laminar. Esto se logra con ayuda de una bomba de agua y gracias a este movimiento y recirculación de la solución nutritiva es que esta se mantiene oxigenada.

Figura 5.

Sistema hidropónico NFT



Nota. Representación de la forma en que funciona un cultivo NFT. Obtenido de Generación Verde (2007). *Sistema hidropónico por goteo*. (<https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>). Consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.1.6.4. Raíz flotante

Sistema de raíz flotante: en este sistema las plantas se encuentran flotando, de modo que sus raíces se sumerjan en solución nutritiva gracias a la ayuda de una lámina perforada. Una bomba de aire se encarga de proporcionar el oxígeno necesario a las raíces.

Figura 6.

Sistema hidropónico por raíz flotante



Nota. Representación gráfica de un cultivo con raíz flotante. Obtenido de Generación Verde (2007). *Sistema hidropónico por goteo.* (<https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>). Consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.1.6.5. Aeropónico

En este sistema las raíces de las plantas están suspendidas en el aire debajo de una plancha de poliestireno, donde por nebulización se hace llegar la solución nutritiva por unos cuantos segundos, lo suficiente para humedecer el oxígeno y las raíces.

Figura 7.

Sistema hidropónico por aeroponía



Nota. Representación gráfica de un sistema por Aeroponía. Obtenido de Generación Verde (2007). *Sistema hidropónico por goteo.* (<https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>). Consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2. Lechuga

La lechuga, de nombre científico (*Lactuca sativa*), es una planta que se considera de cultivo rústico, es decir, que es capaz de sobrevivir condiciones adversas de crecimiento. Por esta razón se cultiva de forma anual en regiones templadas con fines alimenticios, aunque también ha adquirido usos religiosos y medicinales.

La lechuga posee una raíz típica, que crece verticalmente hacia abajo, ramificada de aproximadamente 25 centímetros. Su crecimiento, se da en disposición circular en donde todas las hojas se encuentran a la misma altura, alrededor de un tallo central de forma cilíndrica que progresivamente crece para producir inflorescencias. Sus hojas dependen de las variedades y pueden ser lisas, onduladas o aserradas.

2.2.1. Variedades de lechuga

La lechuga es un tipo de cultivo que se utiliza en todo el mundo desde hace miles de años y es por ello que han surgido tantas variedades de la misma. Además, cuenta con gran adaptabilidad ante climas que para otros cultivos podrían considerarse hostiles por lo que permite pude cultivarse en varias regiones.

2.2.1.1. Romana

Es una variedad que posee un corazón bastante firme y una cabeza larga con hojas robustas. Las hojas son estrechas y alargadas, pero no siempre forman un corazón muy compacto. Generalmente, se encuentran en color verde

claro o brillante, aunque también existen con manchas o de color rojo. Su textura es carnosa y levemente crujiente.

Figura 8.

Lechuga Romana



Nota. La lechuga romana posee un corazón firme, cabeza larga y hojas robustas. Obtenido de Liberty Prim (s.f.). *Lechuga Romana*. (<https://www.libertyprim.com/es/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.1.2. *Iceberg*

Se considera el tipo de lechuga más dura que hay y tiene tonalidades muy claras de verde respecto a las demás. Con hojas que tienen un borde ligeramente ondulado que forman una cabeza redonda y compacta, rica en agua y crujiente por excelencia. El tallo tiene forma de disco donde aparecen las hojas que forman rosetas.

Figura 9.

Lechuga iceberg



Nota. Imagen de la lechuga tipo iceberg. Obtenido de De la Huerta (s.f.). *Lechuga tipo iceberg*. (<https://delahuertacasa.com/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.1.3. Canasta

Posee un centro tierno y claro, de cabeza ancha y compacta que toma un color verde en las partes interiores de las hojas y moteadas de rojo conforme más se llega al exterior, sus hojas son carnosas, pero no crujientes.

Figura 10.

Lechuga canasta



Nota. Imagen de la lechuga tipo Canasta. Obtenido de Vegs and flowers (s.f.). *Lechuga Canasta*. (<https://vegsandflowers.es/p/1572/lechuga-canasta-f1>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.1.4. Lollo

Es un tipo de lechuga que se caracteriza por tener hojas onduladas y rizadas, formando una cabeza suelta y voluminosa. Las hojas crean un efecto de degradado debido a que conforme se va llegando al interior, sus colores se van aclarando.

Figura 11.

Lechuga Lollo



Nota. Imagen de la lechuga tipo Lollo. Obtenido de Vegs and flowers (s.f.). *Lechuga Lollo*. (<https://vegsandflowers.es/p/1572/lechuga-canasta-f1>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.1.5. Lechuga mantequilla

La lechuga mantequilla o de mantequilla tiene hojas suaves y tiernas con una textura muy parecida a la mantequilla, de aquí su nombre común. Su color va de verde claro a amarillo pálido, con textura aterciopelada. El centro suele ser más tierno respecto a distintas variedades de lechuga. De hojas rizadas y pequeñas, formando una cabeza de textura crujiente.

Figura 12.

Lechuga mantequilla



Nota. Imagen de la lechuga tipo mantequilla. Obtenido de La huerta Exprés (s.f.). *Lechuga Mantequilla*. (<https://lahuertaexpressgt.com/product/lechuga-mantequilla/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.1.6. **Lechuga Simpson**

Es una variedad de lechuga que tiene hojas sueltas caracterizadas por ser de gran tamaño y onduladas de color verde claro. Además, son más tiernas mientras más se llega al centro y tienen textura crujiente y fresca.

Figura 13.

Lechuga Simpson



Nota. Imagen de la lechuga tipo Simpson. Obtenido de Emociones verdes (s.f.). *Lechuga Simpson*. (<https://emocionesverdes.com.co/producto/semilla-lechuga-black-seeded-simpson/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.2. Requerimientos nutricionales

Los requerimientos nutricionales de las plantas varían de acuerdo a la etapa de desarrollo en que los cultivos se encuentran. Por esta razón, en la lechuga y en demás cultivos en general, se requiere de fertilizantes o soluciones nutritivas con los niveles óptimos de minerales y nutrientes para que satisfaga las necesidades de crecimiento y desarrollo de las plantas.

En la actualidad, se utiliza el rango de suficiencia (RS) para conocer sobre el estado de nutrición de los cultivos, en el cual la composición mineral de los diferentes tejidos vegetales se expresa como concentración. Los niveles del RS están sujetos a las interacciones entre nutrientes y la edad de la planta. A continuación, los requerimientos nutricionales de una lechuga en cultivos hidropónicos:

Tabla 1.

Rangos de deficiencia, suficiencia y toxicidad de nutrientes en hoja de lechuga

Elementos		Rango	
Macronutrientes [ppm]	Deficiente	Rango medio	Tóxico
Nitrógeno – N	-	2.10 – 5.60	-
Fósforo – P	< 0.58	0.40 – 0.93	-
Potasio – K	< 0.391	3.91 – 9.77	-
Calcio – Ca	< 0.80	0.88 – 2.00	-
Magnesio – Mg	< 0.29	0.36 – 0.90	-
Azufre – S	< 0.20	0.19 – 0.41	-

Continuación de la Tabla 1.

Micronutrientes [ppm]	Deficiente	Rango Medio	Tóxico
Hierro – Fe	-	56 – 58	-
Manganoso – Mn	< 22	30 – 198	> 197
Boro – Bo	< 22	22 – 65	> 75
Cobre – Cu	< 2.5	5 – 17	-
Zinc – Zn	< 26	33 – 196	-
Molibdeno – Mb	< 0.2	0.2 – 0.38	> 392

Nota: Requerimientos nutricionales de hoja de lechuga. Elaboración propia, realizado con Word.

2.2.3. Enfermedades

Como cualquier ser vivo, las lechugas sufren de enfermedades que atacan al desarrollo de la planta. Estas enfermedades pueden ser provocadas por distintos organismos y pueden atacar desde las hojas de la lechuga, hasta las raíces de la misma.

2.2.3.1. *Botrytis cinerea*

Es una enfermedad que afecta hojas, tallos y flores de las plantas, detiene su crecimiento, se ponen de un color amarillo y se marchitan. Se produce debido a la presencia de un hongo patógeno, por lo que se recomienda el periódico uso de tratamientos preventivos.

Figura 14.

Botrytis cinerea en lechuga



Nota. Enfermedad que afecta hojas, tallos y flores de las plantas. Obtenido de P. Sepúlveda (2021). *Pudrición gris o Botrytis cinerea en lechuga*. (<https://www.portalfruticola.com/noticias/2022/07/19/pudricion-gris-en-lechuga/>), consultado el 10 de marzo de 2024. Derechos de autor por Paulina Sepúlveda.

2.2.3.2. *Bremia lactucae*

El oomiceto de la familia *Peronosporaceae*, *Bremia lactucae* provoca la enfermedad denominada mildiu, cuyos principales síntomas son manchas cloróticas en el haz de las hojas y una esporulación de color blanco debajo de las mismas.

Figura 15.

Bremia lactucae



Nota. Provoca la enfermedad denominada mildiu. Obtenido de Seipasa. (2021). *Mildiu en lechuga: en busca de aliados para su control.* (<https://www.seipasa.com/es/blog/mildiu-en-lechuga-en-busca-de-aliados-para-su-control/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.3.3. Podredumbre blanca

Es una enfermedad que se desarrolla con gran facilidad en ambientes húmedas y temperaturas templadas. Consiste en la aparición de manchas blancas debido a la deterioración progresiva de la planta, iniciando desde el tallo hasta extenderse por el resto de la planta. Se recomienda controlar el exceso de humedad y evitar cambios bruscos de temperatura.

Figura 16.

Podredumbre blanca



Nota. enfermedad que se desarrolla con gran facilidad en ambientes húmedas y temperaturas templadas. Obtenido de INTAGARI (s.f.). *Pudrición blanca en la lechuga causada por el hongo Sclerotinia* [Fotografía]. (<https://www.intagri.com/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.3.4. Virus mosaico de lechuga

Esta enfermedad es la que mayor daño causa en los cultivos de lechuga ya que afecta a la planta en cualquier fase de crecimiento y es propagada por algún vector, pulgones, o transmitido por otra planta. Los síntomas son jaspeados de tonalidades verdosas a amarillentas y deformaciones foliares, especialmente hojas externas enrolladas.

Figura 17.

Virus mosaico de lechuga



Nota. Enfermedades causadas por virus en hortalizas de hoja. Obtenido de INTAGARI (s.f.). *Pudrición blanca en la lechuga causada por el hongo Sclerotinia* [Fotografía]. (<https://www.intagri.com/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.4. Plagas

En general, las plagas que afectan a las lechugas son pequeños insectos o microorganismos que se alimentan de los nutrientes de la planta, impidiendo su crecimiento pleno. Existen distintos métodos para el control de ellas como lo son la utilización de mallas para la protección de cultivos o bien pesticidas e insecticidas naturales o químicos.

2.2.4.1. Trips

Son insectos diminutos, delgados con vello en el borde de sus alas, producen picaduras de larvas y adultos en las hojas, donde su saliva es inyectada en los tejidos celulares de la planta provocando necrosis.

Figura 18.

Trips



Nota. Son insectos diminutos, delgados con vello. Obtenido de Syngenta (2022). *Daños de trips en lechugas.* (<https://www.syngenta.es/blog/como-afectan-los-danos-de-plagas-en-el-cultivo-de-lechuga>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.4.2. Minadores de la lechuga

Son larvas de insectos que habitan en el interior de las hojas, sus picaduras provocan la pérdida de superficie foliar y en ocasiones, una posible reacción de hipersensibilidad. Además, disminuyen la capacidad fotosintética de las hojas, pérdidas de peso y, en consecuencia, su coste comercial.

Figura 19.

Minadores de lechuga



Nota. Son larvas de insectos que habitan en el interior de las hojas. Obtenido de C. Reyes (2015). *Minador de la hoja – Liriomyza sp.* (<https://panorama-agro.com/?p=1534>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.4.3. Mosca blanca

Cuentan con un aparato bucal picador-succionador que se alimenta de la savia de las plantas, robándoles nutrientes y agua que a gran escala llegan a debilitar y marchitar los cultivos. Suelen situarse en el envés de las hojas, por lo que es importante monitorear dicha parte de la planta.

Figura 20.

Mosca blanca



Nota. Se alimenta de la savia de las plantas. Obtenido de Certis Belchim (s.f.). *Adulto de Trialeurodes vaporariorum.* (<https://certisbelchim.es/mosca-blanca-que-es-y-como-se-combate/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

2.2.4.4. Pulgones

Es la plaga más común en los cultivos de lechuga. Provocan daños directos como la sustracción de linfa, que se refleja con el debilitamiento de la planta, haciendo que se enfermen o inclusive mueran y, daños indirectos como consecuencia de transmisión de virus.

Figura 21.

Pulgones



Nota. Es la plaga más común en los cultivos de lechuga. Obtenido de National Pesticide Information Center (2024). *Áfidos.* (<http://npic.orst.edu/pest/aphid.es.html>), consultado el 10 de marzo de 2024. Derechos de autor por National Pesticide Information Center.

2.3. Tarjetas de desarrollo

Las tarjetas de desarrollo son herramientas que facilitan la creación de prototipos tecnológicos a los usuarios debido a que cuentan con unidades de procesamiento de información, como lo son los microcontroladores o dispositivos lógicos, así como elementos como puertos, conectores y reguladores para realizar distintos proyectos de desarrollo e investigación.

Dentro de sus componentes principales está la memoria, el bus de comunicación, puertos de entrada y salida, como USB, Ethernet, pines de entrada y salida y en algunos casos cuentan con comunicación Wi-Fi.

2.3.1. Microcontrolador

Los microcontroladores son circuitos integrados optimizados para controlar funciones específicas en sistemas embebidos. Son una especie de computadoras miniatura que se utilizan en variedad de aplicaciones de la vida cotidiana o bien en dispositivos médicos o equipos industriales con el objetivo principal de automatizar procesos y procesar información.

Generalmente, incluyen una CPU, memoria (RAM, ROM, EEPROM), puertos de entrada y salida, temporizadores, conversores analógicos-digitales (ADC) y otras características integradas para el control de dispositivos y procesos en tiempo real.

Estos microcontroladores se programan utilizando lenguajes de programación como C, C++, o ensamblador, y se utilizan con frecuencia en combinación con tarjetas de desarrollo como Arduino o Raspberry Pi para crear prototipos y sistemas completos.

2.3.1.1. Arduino

Es una plataforma basada en *software* y *hardware* libre utilizada en la creación de electrónica de código abierto. Permite la creación de microordenadores que pueden tener distintos tipos de uso.

El hecho de ser *hardware* libre significa que cualquier individuo o empresa puedan desarrollar una placa tomando como base las especificaciones de Arduino, ya que son de acceso público. El *software* libre, quiere decir que todos los códigos de desarrollo son libres para utilizarlo o modificarlo a conveniencia. Cuenta con su propio entorno de programación llamado Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), un *software* que puede ser utilizado tanto en Windows, macOS y GNU/Linux.

Para su funcionamiento, se graban instrucciones con lenguaje de programación en el entorno Arduino IDE, las cuales son trasladadas a los circuitos integrados que permiten la creación de programas al interactuar con los circuitos de la placa.

2.3.1.1.1. Arduino Uno

Es una placa de desarrollo basada en el microchip ATmega328P que dispone de 14 pines de entradas/salidas digitales, de los cuales 6 pueden utilizarse como salidas PWM, 6 entradas analógicas programables con el Arduino IDE a través de un cable tipo USB B. Cuenta con un resonador cerámico de 16 MHz, un Jack de alimentación, pines ICSP y un botón de reinicio. Se alimenta a través del cable USB o bien por una batería externa de 9 voltios, aunque acepta voltajes entre 7 y 20 voltios.

Tabla 2.*Especificaciones técnicas Arduino Uno Rev3*

Característica	Especificación
Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límites)	6-20 V
Pines E/S digitales	14 (6 con salida PWM)
Pines PWM E/S digitales	6
Pines análogos de entrada	6
Corriente DC por pin E/S	20 mA
Corriente DC para pin 3.3V	50 mA
Memoria flash	32 kB
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Velocidad de reloj	16 MHz
Pin_Led	13
Longitud	68.8 mm
Ancho	53.4 mm
Peso	25 g

Nota. Especificaciones técnicas Arduino Uno Rev3. Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Uno Rev3*. (<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/>), consultado el 11 de marzo de 2024. De dominio público.

Figura 22.

Arduino Uno Rev3



Nota. Es una placa de desarrollo basada en el microchip ATmega328P . Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Uno Rev3*. (<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/>), consultado el 11 de marzo de 2024. De dominio público.

2.3.1.1.2. **Arduino Mega**

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica basada en el microprocesador Atmega2560 posee 54 pines configurables como entradas/salidas digitales (de los cuales 14 se puede utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puerto serial), velocidad de relo de 16 MHz, una conexión USB para descargar el *software* de operación (No requiere ningún programador externo).

Tabla 3.

Especificaciones técnicas Arduino Mega 2560 Rev3

Característica	Especificación
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límites)	6-20 V
Pines E/S digitales	54 (15 con salida PWM)
Pines PWM E/S digitales	15

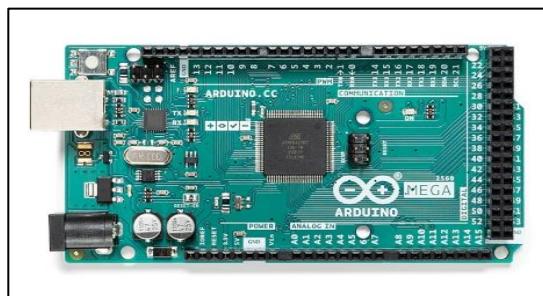
Continuación de la Tabla 3.

Característica	Especificación
Pines análogos de entrada	16
Corriente DC por pin E/S	20 mA
Corriente DC para pin 3.3V	50 mA
Memoria flash	256 kB
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Velocidad de reloj	16 MHz
Pin_LED	13
Longitud	101.52 mm
Ancho	53.3 mm
Peso	37 g

Nota. Especificaciones técnicas Arduino Mega 2560 Rev3. Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Mega 2560 Rev3.* (<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>), consultado el 11 de marzo de 2024. De dominio público.

Figura 23.

Arduino Mega 2560 Rev3



Nota. Es una placa electrónica basada en el microprocesador Atmega2560 posee 54 pines. Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Mega 2560 Rev3.* (<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>), consultado el 11 de marzo de 2024. De dominio público.

2.3.1.1.3. Arduino Nano

El Arduino Nano es una placa pequeña, completa, basada en el microchip ATmega328. Carece solo de un conector de alimentación de CC, y funciona con un cable Mini-B USB en lugar de uno estándar.

Tabla 4.

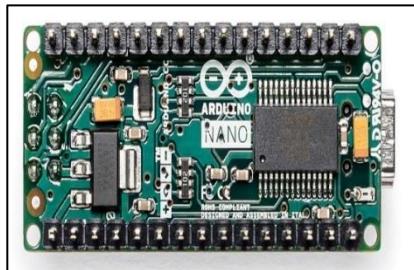
Especificaciones técnicas Arduino Nano

Característica	Especificación
Microcontrolador	ATmega328
Arquitectura	AVR
Voltaje de operación	5 V
Memoria flash	32 kB
SRAM	2 kB
Velocidad de reloj	16 MHz
Pines análogos de entrada	8
EEPROM	1 kB
Corriente DC por pin E/S	20 mA
Voltaje de entrada	7 - 12 V
Pines E/S digitales	22 (6 con salida PWM)
Pines de salida PWM	6
EEPROM	4 kB
Intensidad de consumo	19 mA
Tamaño PCB	18x45 mm
Peso	7 g

Nota. Especificaciones técnicas Arduino Nano. Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Nano*. (<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano>), consultado el 11 de marzo de 2024. De dominio público.

Figura 24.

Arduino Nano



Nota. Arduino. Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Mega 2560 Rev3*. (<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>), consultado el 11 de marzo de 2024. De dominio público.

2.3.1.1.4. **Arduino Leonardo**

El Arduino Leonardo es una placa microcontroladora basada en el ATmega32u4. Tiene 20 pines de entradas/salidas digitales (de los cuales 7 se pueden usar como salidas PWM y 12 como entradas analógicas), velocidad de reloj de 16 MHz, una conexión micro USB, un conector de alimentación, un pin ICSP y un botón de reinicio.

Tabla 5.

Especificaciones técnicas Arduino Leonardo

Característica	Especificación
Microcontrolador	ATmega32u4
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7 - 12 V
Voltaje de entrada (límites)	6 - 20 V
Pines E/S digitales	20

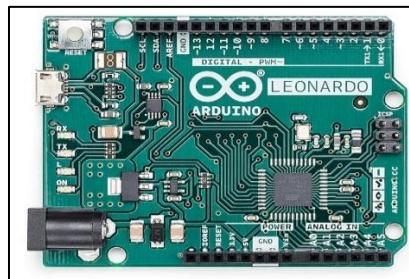
Continuación de la Tabla 5.

Característica	Especificación
Pines PWM	7
Pines análogos de entrada	12
Corriente DC por pin E/S	40 mA
Corriente DC para pin 3.3V	50 mA
Memoria flash	32 kB
SRAM	2.5 kB
EEPROM	1 kB
Velocidad de reloj	16 MHz
Longitud	68.6 mm
Ancho	53.3 mm
Peso	20 g

Nota. Especificaciones técnicas Arduino Leonardo. Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Leonardo*. (<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-leonardo-with-headers?selectedStore=us>). Consultado el 11 de marzo de 2024. De dominio público.

Figura 25.

Arduino Leonardo



Nota. Es una placa microcontroladora basada en el ATmega32u4. Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Leonardo*. (<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>), consultado el 11 de marzo de 2024. De dominio público.

2.3.1.2. Puertos Arduino

Se refiere a los distintos puntos de conexión que posee una placa Arduino estándar, estos son utilizados para la entrada y salida de datos:

- Puerto de alimentación: es el puerto donde se conecta la fuente para suministrar energía a la placa, esto puede ser realizado mediante un cable USB o bien, mediante un adaptador de corriente.
- Puertos de entrada/salida digitales: son los pines de entradas y salidas digitales, estos se configuran para enviar o recibir señales digitales 0 o 1 y son identificables la placa por la letra D.
- Puertos de entrada analógica: son los pines utilizados para leer valores analógicos, es decir, aquellos que provienen de sensores de luz o temperatura, por ejemplo. Se identifican por una letra A en la placa.
- Puerto de comunicación serial: también denominado puerto serie, es el que se utiliza para la comunicación serie con distintos dispositivos, como una computadora. En este puerto se cargan los programas en la placa y para la comunicación de depuración.
- Puertos de comunicación I2C y SPI: son un tipo de pines de comunicación serial, pero estos son utilizados para conectar algún dispositivo externo como algún sensor o pantalla a la placa Arduino.
- Puerto de alimentación de 5V y tierra (GND): son los puntos de conexión de alimentación en 5V y de tierra, respectivamente, también pueden utilizarse para establecer valores de referencia.

2.3.1.3. Sistema operativo

Arduino no cuenta con un sistema operativo completo como Windows, macOS o Linux, en cambio utiliza un firmware que gestiona la comunicación entre el *hardware* de la placa y el código que se carga en la misma. Este firmware proporciona una serie de bibliotecas y funciones que permiten el control de los distintos componentes en la placa, como lo son los pines de entradas y salidas, temporizadores, entre otros. Todo esto haciendo que Arduino facilite la programación de aplicaciones embebidas y sea una plataforma simple para la elaboración de proyectos de automatización en electrónica y demás.

2.3.1.4. Lenguajes de programación

El lenguaje de programación de Arduino es una variante optimizada del lenguaje C/C++, este es ingresado en el entorno de desarrollo integrado, Arduino IDE, y luego trasladado a los microcontroladores Arduino.

A pesar de que este lenguaje se basa en funciones y estructuras de control similares a C/C++, Arduino como tal, proporciona una serie de funciones y bibliotecas que facilitan y simplifican al usuario muchas tareas en electrónica.

2.3.1.5. Módulos y sensores

Las placas de Arduino son compatibles con una amplia gama de módulos y sensores que pueden ampliar las capacidades de los proyectos a realizar. Algunos de ellos son:

- Módulos GPS: el módulo NEO-6M añade capacidades de posicionamiento y seguimiento por GPS.
- Módulos de comunicación: existen los módulos Bluetooth HC-05/HC-06 o módulos Wi-Fi ESP8266/ESP32 que facilitan la comunicación a distancia con otros dispositivos.
- Módulos de pantalla: como pantallas LED o LCD para mostrar información visual.
- Sensores de temperatura y humedad: el DHT11 o DHT22 que permiten llevar un control de la temperatura y la humedad ambiental.
- Sensores de luz: como el LDR o sensor de luz de ambiente que permite la detección de luz en un entorno.
- Sensores de movimiento: como el PIR (infrarrojo pasivo) que se utiliza para detectar el movimiento de objetos o personas en su campo de visión.
- Sensores de distancia: como el sensor ultrasónico HC-SR04 para pedir la distancia entre un objeto a otro mediante ondas ultrasónicas.

2.3.2. Raspberry Pi

Raspberry Pi es una serie de computadoras de placa única, SBC por sus siglas en inglés, que fue desarrollada por la Fundación Raspberry Pi. Estas pequeñas computadoras son de bajo costo, consumen poca energía, pero son tan potentes que pueden llegar a funcionar como una computadora básica,

aunque no incluya dispositivos auxiliares como teclados y/o ratones o inclusive carcasa.

La mayoría de los dispositivos Raspberry Pi cuentan con puertos de conexión Ethernet y/o Wi-Fi integrados para facilitar la conexión a internet y la comunicación con otros dispositivos. Además, son tan versátiles que se pueden ejecutar en distintos sistemas operativos como Ubuntu, Windows, Debian y otros sistemas operativos especializados.

2.3.2.1. Raspberry Pi Pico Series

La familia de microcontroladores Raspberry Pi Pico son de bajo costo y alto rendimiento que están diseñados para ser una plataforma accesible y versátil para los usuarios.

La familia Raspberry Pi Pico se compone por Raspberry Pi Pico y Pico H, que son iguales en funcionamiento con la diferencia que la Pico H cuenta con conectores tipo *header* ya soldados.

Además, también está conformada por la Raspberry Pi Pico W y Pico WH, que son las versiones con interfaces Wi-Fi de banda única de 2.4 GHz para conectividad inalámbrica. Y del mismo modo, la versión Pico WH posee conectores tipo *header* ya soldados.

Tabla 6.

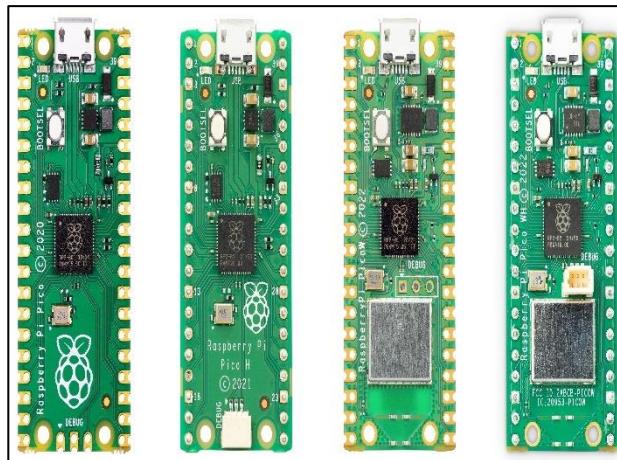
Especificaciones técnicas Raspberry Pi Pico y Pico W

Especificaciones técnicas	
Raspberry Pi Pico	Raspberry Pi Pico W
Microcontrolador RP2040	Microcontrolador RP2040
CPU ARM Cortex M0 + dual-core a 133MHz	CPU ARM Cortex M0 + dual-core a 133MHz
264 KB de RAM	264 KB de RAM
Sin conectividad inalámbrica	Conectividad inalámbrica Wi-Fi y Bluetooth 5.1
26 pines GPIO	26 pines GPIO
Interfaz USB 1.1	Interfaz USB 1.1

Nota. Especificaciones básicas de la Raspberry Pi Pico Series. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 26.

Raspberry Pi Pico Series



Nota. La familia Raspberry Pi Pico se compone por Raspberry Pi Pico y Pico H. Obtenido de Raspberry Pi. (s.f.). *Raspberry Pi Pico (extremo izquierdo), Pico H (centro izquierdo), Pico W (centro derecho) y Pico WH (extremo derecho).*

(<https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/raspberry-pi-pico.html>),

consultado el 12 de marzo de 2024. De dominio público.

2.3.2.2. Raspberry Pi 4

Es la cuarta generación de las SBS Raspberry Pi. Esta ofrece mejoras significativas en comparación a sus predecesoras, incluyendo un mejor procesador, mayor capacidad de memoria RAM, más puertos USB, así como soporte para resoluciones de pantalla más altas.

Es una opción más poderosa y versátil que puede utilizarse en una amplia variedad de aplicaciones, desde servidores domésticos, hasta estaciones ligeras de trabajo.

Tabla 7.

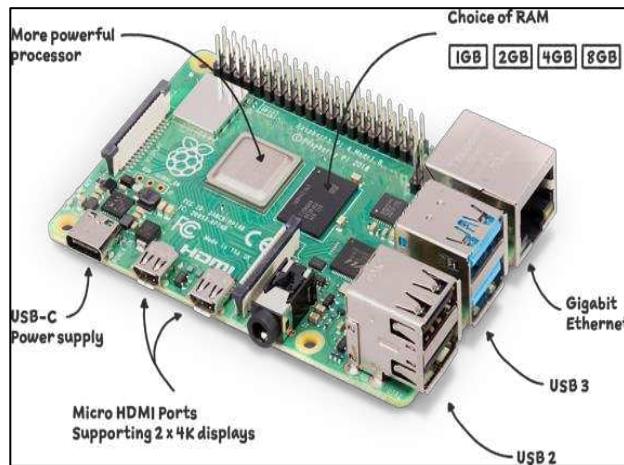
Especificaciones técnicas Raspberry Pi 4

Característica	Descripción
Procesador	Broadcom BCM2711, CPU de cuatro núcleos Cortex-A72 a 1.5 GHz
Memoria RAM	2 GB, 4 GB u 8GB LPDDR4-3200 SDRAM
Conectividad	Ethernet Gigabit, Wi-Fi 802.11 ac, Bluetooth 5.0
Puertos USB	2 x USB 3.0, 2 x USB 2.0
Almacenamiento	Ranura para tarjeta microSD
Salida de video	2 x micro HDMI (hasta 4K a 60Hz)
Audio	Conector de audio de 3.5 mm, soporte para audio digital sobre HDMI
Alimentación	Puerto USB-C para alimentación
GPIO	40 pines GPIO
Dimensiones	85.6 mm x 56.5 mm

Nota. Especificaciones básicas de la Raspberry Pi 4. Elaboración propia, realizando con Excel.

Figura 27.

Raspberry Pi 4



Nota. Esta ofrece mejoras significativas en comparación a sus predecesoras. Obtenido de Raspberry Pi (s.f.). *Raspberry Pi 4*. (<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>). Consultado el 12 de marzo de 2024. De dominio público.

2.3.2.3. Raspberry Pi Zero 2 W

La Raspberry Pi Zero 2 W es significativamente más potente a su predecesora, la Raspberry Pi Zero debido a que cuenta con un procesador de cuatro núcleos funcionando a 1GHz. También, está equipada con 512 MB de RAM, lo que permite que pueda ejecutar gran variedad de aplicaciones y sistemas operativos. Es de tamaño reducido, pero aún así, incluye conectividad inalámbrica Wi-Fi 2.4 GHz 802.11b/g/n y Bluetooth 4.2 BLE.

La Raspberry Pi Zero 2 es ideal para proyectos con costos y espacios limitados pero que requieran un rendimiento decente. Su uso va desde dispositivos IoT sencillos, hasta proyectos embebidos de mayor complejidad.

Tabla 8.

Especificaciones técnicas Raspberry Pi Zero 2 W

Característica	Descripción
Procesador	Broadcom BCM2701A1, COU de cuatro núcleos Cortex-A53 a 1GHz
Memoria RAM	512 MB de SDRAM LPDDR2
Conectividad	Wi-Fi 2.4 GHz 802.11b/g/n, Bluetooth 4.2 BLE
Puertos	1x micro HDMI, 1x micro USB OTG, 1x conector para cámara CSI-2, 1x conector para pantalla DSI, 1x conector de expansión de 40 pines GPIO
Dimensiones	65 mm x 30 mm x 5 mm

Nota. Especificaciones básicas de la Raspberry Pi Zero W. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 28.

Raspberry Pi Zero 2 W



Nota. Es significativamente más potente a su predecesora, la Raspberry Pi Zero Obtenido de Raspberry Pi (s.f.). *Raspberry Pi Zero 2 W.* (<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/>). Consultado el 12 de marzo de 2024. De dominio público.

2.3.2.4. Raspberry Pi 3 Model Series

La Raspberry Pi 3 Model Series es un conjunto de placas de ordenador de bajo costo que comparten características similares, pero con diferencias de conectividad y tamaño. Esto significa que esta serie de Raspberry Pi, ofrece una gran adaptabilidad ante distintas necesidades y presupuestos, dependiendo las necesidades específicas de los proyectos a realizar.

Tabla 9.

Especificaciones técnicas Raspberry Pi 3 Model Series

Característica	Raspberry Pi 3 Model	Raspberry Pi 3	Raspberry Pi 3 Model
	A+	Model B	B+
Procesador	Broadcom BCM2837B0, 1.4 GHZ	Broadcom BCM2837, 1.2 GHz	Broadcom BCM2837B0, 1.4 GHZ
Núcleos	4 núcleos	4 núcleos	4 núcleos
Memoria RAM	512 MB	1 GB	1 GB
Conectividad	Wi-Fi 802.11b/g/b, Bluetooth 4.2	Wi-Fi 802.11b/g/b, Bluetooth 4.1	Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 4.2
Ethernet	No	Sí	Sí
Puertos USB	1 x USB 2.0	4x USB 2.0	4x USB 2.0
Puerto HDMI	Sí	Sí	Sí
Conector de cámara	Sí	Sí	Sí
Conector de pantalla	Sí	Sí	Sí
GPIO	40 pines GPIO	40 pines GPIO	40 pines GPIO
Almacenamiento	Ranura para tarjeta microSD	Ranura para tarjeta microSD	Ranura para tarjeta microSD
Dimensiones	65 mm x 56 mm	85 mm x 56 mm	85 mm x 56 mm

Nota. Especificaciones básicas de la Raspberry Pi 3 Model Series. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 29.

Raspberry Pi Model 3 Series



Nota. Es un conjunto de placas de ordenador de bajo costo que comparten características similares. Obtenido de Raspberry Pi (s.f.). *Raspberry Pi 3 Model A+ (izquierda), Raspberry Pi 3 Model B (centro) y Raspberry Pi 3 Model B+ (derecha)* (<https://www.raspberrypi.com/>). Consultado el 12 de marzo de 2024. De dominio público.

2.3.2.5. Sistema operativo de la Raspberry Pi

La Raspberry Pi cuenta con un sistema operativo específico llamado Raspberry Pi Os, previamente llamado Raspbian, y está basado en Debian, una distribución de *software* libre del sistema operativo GNU/Linux conocida por ser estable, segura y tener un amplio soporte de *hardware*.

Raspberry Os está optimizado para el *hardware* de la Raspberry Pi, y es el sistema operativo que se recomienda para utilizar con la misma debido a que es fácil de usar y principalmente, porque viene preinstalado con aplicaciones y herramientas útiles para el máximo provecho de las capacidades de las Raspberry Pi.

A pesar de que la Raspberry Pi cuenta con su propio sistema operativo, la Raspberry Pi puede ejecutar distintos sistemas operativos como son Ubuntu, Windows 10 IoT Core, LibreELEC y OSMC, RetroPie, DietPi, entre otros.

2.3.2.6. Lenguajes de programación

Debido a la versatilidad de la Raspberry Pi, esta puede programarse en una gran variedad de lenguajes de programación. El lenguaje dependerá del proyecto específico y de las habilidades del usuario. Algunos son:

- Python
- C
- C++
- Java
- JavaScript
- Scratch.

2.3.2.7. Módulos y sensores

La Raspberry Pi es capaz de conectarse a una amplia variedad de módulos y sensores para ampliar sus capacidades y permitir realizar varios proyectos. Algunos de estos módulos y sensores son:

- Módulos GPS: permiten añadir capacidades de localización a la Raspberry Pi.
- Módulos de cámara: como Raspberry Pi Camera Module 3 para capturar imágenes y videos de alta calidad.
- Módulos de pantalla: como la pantalla táctil oficial de Raspberry Pi o pantallas LCD u OLED que permiten mostrar información visual.

- Módulos de comunicación: como módulos Wi-Fi o Bluetooth en caso de que el modelo seleccionado carezca de los mismos.
- Módulo relé: como el relé de 4 canales que permite controlar dispositivos eléctricos o motores.
- Módulo de detección de llama: como el módulo de detección de llama IR para detectar la presencia de una llama en el entorno.
- Módulo de detección de movimiento por ultrasonido: como el HC-sR04 para medir distancia entre el sensor y un objeto utilizando ondas ultrasónicas.
- Módulo RFID: como el RFID-RC522 que permite leer etiquetas RFID y utilizarlas para la identificación de objetos o personas.
- Sensores de temperatura y humedad: como el DHT11 o DHT22.
- Sensores de movimiento: como el módulo PIR, que detecta cambios en el movimiento y es utilizado para proyectos de seguridad.
- Sensores de luz: como el TSL2561 que permite medir la luz ambiental y ajustar la iluminación.
- Sensores de sonido: como el KY-038 para detectar niveles de sonido en el entorno.
- Sensores de gas: como el MQ-2 para detectar gases combustibles y humo en el aire.

2.3.3. **Software de simulación**

Un *software* de simulación es una herramienta informática que permite el modelado y simulación del comportamiento de sistemas y procesos en un entorno virtual. Este tipo de programas utilizan modelos matemáticos para la representación del funcionamiento de sistemas reales y se utilizan en una variedad de campos.

Algunos ejemplos de *softwares* de simulación son:

- Simuladores de circuitos electrónicos: permiten simular el comportamiento de circuitos eléctricos y electrónicos, como Fritzing, Tinkercad, entre otros.
- Simuladores de dinámica de fluidos: permiten simular el flujo de fluidos en sistemas como tuberías, ventiladores, y bombas, como OpenFOAM, ANSYS Fluent, entre otros.
- Simuladores de mecánica: permiten simular el movimiento y la interacción de objetos físicos, como SolidWorks Simulation, Autodesk Inventor, entre otros
- Simuladores de sistemas eléctricos: permiten simular sistemas eléctricos complejos, como ETAP, PowerWorld, entre otros.
- Simuladores de procesos químicos: permiten simular reacciones químicas y procesos industriales, como Aspen Plus, ProSimPlus, entre otros.

2.3.3.1. Tinkercard

Plataforma en línea gratuita desarrollada por Autodesk que ofrece herramientas de diseño en tres dimensiones, 3D de electrónica y codificación. Se puede crear diseños 3D desde cero o bien, modificar ya existentes. También cuenta con un simulador de circuitos que permite diseñarlos y simularlos utilizando una gran variedad de componentes como resistencias, LEDs, sensores, entre otros.

Además, ofrece una codificación basada en bloques que permite programar el comportamiento de los diseños 3D y circuitos electrónicos de forma interactiva y visual. Tinkercard es una herramienta versátil y sencilla de usar lo que es una excelente opción para el desarrollo de proyectos de electrónica y codificación.

2.3.4. Transductores

Los transductores son dispositivos que permiten detectar, registrar y transformar distintos tipos de energía o magnitudes físicas en señales eléctricas, cuya interpretación es importante para los sistemas de control y de automatización.

Los parámetros de funcionamiento de un transductor son:

- Exactitud: es el valor verdadero de la variable a detectar sin errores en la medición.
- Precisión: es el parámetro que define la existencia o no de una pequeña variación al realizar la medición de la variable.

- Rango de funcionamiento: es el rango de valores dentro del cual el transductor operar de manera efectiva y segura.
- Velocidad de respuesta: es la capacidad de responder antes los cambios en la variable detectada por un corto lapso de tiempo, generalmente, instantáneo.
- Calibración: es el ajuste del transductor para que proporcione resultados precisos y consistentes.
- Fiabilidad: es la medida de las ocasiones que el transductor falla al realizar mediciones.

Tabla 10.

Tipos de transductores

Tipo de transductor	Función
Transductor de temperatura	Mide la temperatura ambiente de un objeto
Transductor de presión	Mide la presión de un fluido o gas
Transductor de luz	Mide la intensidad de la luz visible u otras formas de radiación electromagnética
Transductor de sonido	Convierte ondas sonoras en señales eléctricas y viceversa
Transductor de humedad	Mide el contenido de humedad en el aire o en un material.
Transductor de posición	Mide la posición de un objeto
Transductor de velocidad	Mide la velocidad de un objeto

Continuación de la Tabla 10.

Tipo de transductor	Función
Transductor de fuerza	Mide la fuerza aplicada a un objeto
Transductor de corriente	Mide la corriente eléctrica en un circuito
Transductor de voltaje	mide el voltaje eléctrico de en un circuito
Transductor de aceleración	Mide la aceleración de un objeto
Transductor de magnetismo	Mide el campo magnético
Transductor de inclinación	Mide la inclinación o la posición angular de un objeto
Transductor de humo	Detecta la presencia de humo en el aire
Transductor de gas	Detecta la presencia y la concentración de gases en el aire
Transductor de nivel	Mide y controla el nivel de líquidos o sólidos
Transductor de velocidad de viento	Mide la velocidad del viento

Nota. Tipos de transductores básicos. Elaboración propia, realizado con Excel.

2.3.5. Motores

Existen varios tipos de motores que se describen a continuación:

2.3.5.1. Motores DC

Los motores de corriente continua (DC) son dispositivos electromecánicos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica. Funcionan gracias a la interacción entre un campo magnético generado por imanes permanentes y un campo magnético creado por la corriente eléctrica

que fluye a través de las bobinas del motor. Al cambiar la dirección de la corriente eléctrica, es posible invertir el sentido de giro del motor, lo que permite controlar la velocidad y dirección del motor de forma precisa.

Existen varios tipos de motores DC que se utilizan en diferentes aplicaciones según sus características y requerimientos de funcionamiento. Algunos de los tipos más comunes son:

- Motores DC con escobillas: son los motores DC más simples y comunes. Tienen un rotor con bobinas y un conmutador de escobillas que cambia la dirección de la corriente en el rotor para mantenerlo girando en una dirección constante.
- Motores DC sin escobillas: también conocidos como motores BLDC, estos motores eliminan las escobillas y el conmutador, lo que reduce el desgaste y aumenta la eficiencia. Utilizan un control electrónico para cambiar la dirección de la corriente en los devanados del estator, lo que los hace más eficientes y duraderos que los motores con escobillas.
- Motores paso a paso: son motores DC que convierten pulsos eléctricos en movimientos discretos del eje. Son ideales para aplicaciones que requieren un control preciso del movimiento, como impresoras 3D, máquinas CNC y sistemas de posicionamiento.
- Motores lineales: a diferencia de los motores rotativos tradicionales, los motores lineales convierten la energía eléctrica en movimiento lineal. Se utilizan en aplicaciones donde se requiere un movimiento lineal preciso, como en actuadores y sistemas de transporte.

- Motores DC de imán permanente: estos motores utilizan imanes permanentes en el rotor en lugar de bobinas. Son simples, eficientes y se utilizan en aplicaciones que requieren un tamaño compacto y un funcionamiento eficiente, como en ventiladores y herramientas eléctricas.

2.3.5.2. Motores AC

Los motores de corriente alterna, AC, son dispositivos electromecánicos que convierten la energía eléctrica de corriente alterna en energía mecánica. En un motor de corriente alterna típico, el campo magnético giratorio necesario para producir movimiento se crea en el estator mediante bobinas de alambre por las que circula corriente alterna. Este campo magnético interactúa con el rotor, generando un par motor que hace girar el rotor y, a su vez, el eje del motor.

Los motores de AC pueden ser de varios tipos, algunos de los más comunes son:

- Motores de inducción: son los motores de corriente alterna más comunes. Funcionan mediante la inducción electromagnética, donde un campo magnético rotativo se crea en el estator y produce un movimiento en el rotor sin necesidad de conexiones eléctricas directas. Estos motores son simples, robustos y tienen un bajo mantenimiento.
- Motores síncronos: en estos motores, la velocidad de rotación del rotor está sincronizada con la frecuencia de la corriente alterna suministrada al estator. Son utilizados en aplicaciones que requieren una velocidad constante y precisa, como en relojes, grabadoras de audio y sistemas de ventiladores.

- Motores de reluctancia variable: estos motores aprovechan la tendencia de los objetos ferromagnéticos a moverse hacia las áreas de mayor densidad de flujo magnético. Tienen un diseño simple y se utilizan en aplicaciones donde se requiere un bajo costo y un funcionamiento robusto.
- Motores de imán permanente: utilizan imanes permanentes en el rotor en lugar de bobinas de cobre. Son eficientes y se utilizan en aplicaciones donde se requiere un tamaño compacto y un alto rendimiento, como en vehículos eléctricos y electrodomésticos.
- Motores de jaula de ardilla: son un tipo de motor de inducción en el que el rotor tiene forma de jaula de ardilla. Son robustos, de bajo costo y se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones industriales y comerciales.

2.3.6. Neumática

La neumática es una rama de la tecnología que utiliza aire comprimido para generar energía mecánica. Se basa en el principio de que el aire comprimido puede almacenar energía y transmitirla de manera eficiente a través de sistemas neumáticos para realizar trabajo.

Las aplicaciones comunes de la neumática incluyen sistemas de automatización industrial, sistemas de control de fluidos, herramientas neumáticas, sistemas de frenado y suspensión en vehículos, y una variedad de aplicaciones domésticas, como compresores de aire y herramientas neumáticas.

2.3.6.1. Sistema neumático

En un sistema neumático típico, un compresor comprime el aire atmosférico y lo almacena en un depósito a presión. El aire comprimido se transporta a través de tuberías hacia actuadores neumáticos, como cilindros y motores neumáticos, que convierten la energía neumática en movimiento mecánico.

Las ventajas de los sistemas neumáticos son:

- Simplicidad: los sistemas neumáticos son relativamente simples en diseño y operación, lo que los hace fáciles de mantener y reparar.
- Costo: En comparación con otros sistemas de energía, los sistemas neumáticos tienden a ser más económicos en términos de instalación y operación.
- Control preciso: los sistemas neumáticos pueden proporcionar un control preciso de la velocidad, la fuerza y la posición en diversas aplicaciones.
- Seguridad: como el aire comprimido es relativamente seguro en comparación con otros medios de energía, los sistemas neumáticos son seguros de usar en entornos donde la seguridad es una preocupación.

2.3.6.2. Compresor

Es una máquina que almacena fluidos, principalmente aire, que los comprime dentro de un depósito para aumentar su presión y generar energía neumática. Su funcionamiento se basa en absorber el fluido a la presión del

ambiente y a través de un sistema de filtrada lo almacena y lo comprime. Una vez comprimido, el fluido se devuelve con la presión deseada a salida directa o a un depósito para que se acumule a mayor presión.

Sus características pueden variar de acuerdo al tipo de compresor y a la aplicación para la cual sea necesario, sin embargo, las características generales son:

- Caudal de aire: cantidad de aire que el compresor puede comprimir y suministrar en un período de tiempo determinado.
- Presión de trabajo: es la presión a la que el compresor puede comprimir el fluido.
- Potencia de motor: es la potencia del motor que impulsa el compresor.
- Eficiencia energética: es la medida de la eficiencia con la que el compresor convierte la energía eléctrica en energía neumática.
- Nivel de ruido: es el ruido producido por el compresor durante su funcionamiento.
- Capacidad del depósito: capacidad del depósito de almacenamiento de fluido del compresor.

2.3.6.2.1. Compresores de desplazamiento positivo

Los compresores de desplazamiento positivo son un tipo de compresor que funciona atrapando una cantidad fija de aire y luego reduciendo su volumen para aumentar su presión. Los compresores de desplazamiento positivo son adecuados para aplicaciones donde se requiere una presión constante y un flujo de aire uniforme, como en sistemas de aire acondicionado, refrigeración, herramientas neumáticas y sistemas de transporte neumático.

Los tipos de compresores de desplazamiento positivo son:

- Compresor de pistón: utiliza uno o más pistones que se mueven dentro de un cilindro para comprimir el aire. Estos pueden ser de simple o doble efecto, dependiendo si el pistón comprime aire en una o ambas direcciones.
- Compresor de paletas: utiliza un roto con paletas que se deslizan hacia afuera debido a la fuerza centrípeta, creando una cámara de presión que reduce el volumen de aire y aumente su presión.
- Compresor de tornillo: utiliza dos rotores helicoidales que se entrelazan y giran en direcciones opuestas para comprimir el aire entre ellos.
- Compresor *scroll*: utiliza dos espirales que se desplazan en direcciones opuestas para comprimir el aire entre ellas.

2.3.6.2.2. Compresores dinámicos

Los compresores dinámicos son un tipo de compresor que aumenta la presión de un gas mediante la conversión de energía cinética en energía de presión. Los compresores dinámicos son adecuados para aplicaciones donde se necesita un flujo de aire continuo y una presión constante, como en sistemas de aire acondicionado, sistemas de ventilación, sistemas de propulsión y sistemas de transporte neumático.

Los tipos de compresores dinámicos son:

- Compresor centrífugo: utiliza un rotor giratorio para acelerar el aire y luego frenarlo en un difusor para aumentar su presión.
- Compresor axial: utiliza un rotor con aspas para acelerar el aire en una dirección axial para aumentar su presión.

2.3.6.3. Depósito de aire

El depósito de aire, usualmente llamado calderín, es uno de los componentes esenciales en los sistemas neumáticos, estos varían su tamaño y capacidad según las distintas aplicaciones y necesidades de almacenamiento de aire por lo cual cumple con varias funciones esenciales:

- Almacenamiento de aire comprimido: el depósito actúa como un reservorio para almacenar aire comprimido a alta presión, asegurando un suministro constante de aire incluso cuando la demanda varía en el sistema.

- Amortiguación de pulsaciones: ayuda a suavizar las pulsaciones que los compresores de aire generan durante su funcionamiento, lo que resulta en un suministro de aire más constante y uniforme.
- Eliminación de condensación: previene la acumulación de agua y evita daños en el sistema debido al equipo de drenaje para eliminar condensación.
- Regulación de la presión: están equipados con válvulas de presión para controlar la presión del sistema, garantizando que la presión se mantenga dentro de los límites seguros de operación.
- Reserva de emergencia: en caso de que el compresor falle o se detenga, el depósito de aire puede proporcionar un suministro de aire comprimido temporal para operaciones críticas.

2.3.6.4. Sistema de filtro

Un sistema de filtro es un sistema neumático utilizado para limpiar y purificar el aire comprimido previo a que este entre en el sistema. Los filtros se encargan de eliminar todo tipo de partículas sólidas, humedad y el aceite del aire comprimido, ayudando a prevenir daños en el resto del sistema. Es de vital importancia mantener los filtros limpios y reemplazarlos periódicamente para garantizar su eficacia.

Los filtros en un sistema neumático son:

- Filtro de partículas: elimina partículas sólidas como polvo, suciedad y óxido del aire comprimido. Utiliza un medio filtrante poroso para atrapar las partículas mientras permite que el aire pase a través de él.
- Separador de agua: elimina la humedad del aire comprimido. Utiliza un medio coalescente que atrapa y fusiona las gotas de agua en el aire, permitiendo que se acumulen en la parte inferior del filtro para su drenaje.
- Filtro de aceite: elimina el aceite del aire comprimido. Es importante en aplicaciones donde el aire no debe estar contaminado con aceite, como en la industria alimentaria o farmacéutica.
- Regulador de presión: el regulador de presión se utiliza a menudo en conjunto con los filtros para controlar la presión del aire comprimido que entra en el sistema.

2.3.6.5. Válvula

Es un elemento de mando que se encarga de dirigir y regular el aire comprimido, controlando la entrada y salida, el cierre o habilitación, dirección, presión y caudal del aire comprimido. Por esta razón, una válvula debe poseer elementos o parámetros que intervengan en el proceso de operación de un sistema neumático.

Para la selección de una válvula se debe considerar lo siguiente:

- Número de vías: es el número de orificios controlador en la válvula que pueden ser desde 2 o más vías.

- Posiciones: el número de las posiciones estables del elemento de distribución, pueden ser de 2, 3, 4 o más.
- Caudal: es el volumen de fluido que pasa por el elemento.
- Sistema de accionamiento: es el elemento emisor de la señal que sirve para el control o regulación del sistema.

2.3.6.5.1. Válvula de control direccional

Una válvula de control direccional en un sistema neumático es un tipo de válvula que se utiliza para controlar la dirección del flujo de aire comprimido en el sistema. Estas válvulas pueden tener varias posiciones y se utilizan para dirigir el aire hacia diferentes actuadores o componentes del sistema según sea necesario.

Las válvulas de control direccional pueden tener diferentes configuraciones, como 2/2 vías, 3/2 vías, 5/2 vías, entre otros, que se refieren al número de puertos y posiciones de la válvula. Por ejemplo, una válvula 3/2 vías tiene tres puertos y dos posiciones, lo que significa que puede dirigir el flujo de aire hacia dos direcciones diferentes.

2.3.6.5.2. Válvula de control de caudal

Una válvula de control de caudal en un sistema neumático es un dispositivo utilizado para controlar la cantidad de aire que pasa a través de ella. Estas válvulas se utilizan para regular la velocidad de los actuadores neumáticos y otros dispositivos en el sistema.

Las válvulas de control de caudal pueden ser unidireccionales o bidireccionales, lo que significa que pueden controlar el flujo de aire en una dirección o en ambas direcciones. También pueden tener diferentes tipos de ajuste, como ajuste manual, ajuste con herramientas o ajuste automático.

2.3.6.5.3. Válvula de bloqueo

Una válvula de bloqueo en un sistema neumático es un tipo de válvula que se utiliza para bloquear el flujo de aire en una parte específica del sistema. Estas válvulas se utilizan para aislar secciones del sistema para mantenimiento, reparación o para detener el flujo de aire en caso de emergencia.

Las válvulas de bloqueo pueden tener diferentes configuraciones, como válvulas de bloqueo de una vía, válvulas de bloqueo de dos vías o válvulas de bloqueo de múltiples vías, dependiendo de la aplicación específica. Estas válvulas son esenciales en sistemas neumáticos donde se necesita controlar el flujo de aire en diferentes partes del sistema para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.

2.3.6.5.4. Válvula de alivio de presión

Las válvulas de alivio de presión en un sistema neumático son dispositivos diseñados para proteger el sistema contra presiones excesivas al liberar aire comprimido cuando la presión supera un nivel seguro. Estas válvulas ayudan a prevenir daños en los componentes del sistema y a mantener una operación segura.

Las válvulas de alivio de presión se utilizan en sistemas neumáticos donde la presión del aire puede fluctuar y alcanzar niveles peligrosos. Cuando

la presión del sistema supera el nivel de ajuste de la válvula, ésta se abre y libera aire comprimido para reducir la presión. Una vez que la presión vuelve a un nivel seguro, la válvula se cierra automáticamente.

2.3.6.5.5. Válvula de seguridad

Una válvula de seguridad en un sistema neumático es un tipo de válvula diseñada para proteger el sistema contra presiones excesivas. Estas válvulas se utilizan para liberar aire comprimido de manera controlada cuando la presión en el sistema supera un nivel seguro, evitando así daños en los componentes del sistema y garantizando un funcionamiento seguro.

Las válvulas de seguridad se instalan típicamente en lugares estratégicos del sistema donde la presión puede aumentar de manera significativa y representar un riesgo para la integridad de los componentes del sistema. Cuando la presión del sistema supera el nivel de ajuste de la válvula, ésta se abre y libera aire comprimido de manera segura hasta que la presión vuelve a un nivel seguro.

2.3.6.5.6. Electroválvula

Una electroválvula es un tipo de válvula que se utiliza en sistemas neumáticos y otros sistemas de control para controlar el flujo de fluidos o gases de manera automatizada mediante una señal eléctrica. Estas válvulas son ampliamente utilizadas en una variedad de aplicaciones donde se requiere un control preciso del flujo, como en sistemas de riego, sistemas de control de fluidos industriales, sistemas de aire acondicionado, sistemas de calefacción, entre otros.

Las electroválvulas pueden ser normalmente cerradas (NC), lo que significa que la válvula está cerrada cuando no hay corriente eléctrica aplicada, o normalmente abiertas (NO), lo que significa que la válvula está abierta cuando no hay corriente eléctrica aplicada. La elección entre una electroválvula NC o NO depende de la aplicación específica y de los requisitos de control del sistema.

2.3.6.6. Cilindro neumático

Un cilindro neumático es un dispositivo mecánico que utiliza la presión del aire comprimido para producir movimiento lineal en una dirección. Estos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones industriales y comerciales donde se requiere movimiento lineal, como en sistemas de automatización, máquinas industriales, equipos de manipulación, entre otros.

Aquí hay una descripción general de un cilindro neumático típico:

- Cuerpo del cilindro: es la parte principal del cilindro que contiene el pistón y el vástago, y está sellado para contener el aire comprimido. Puede estar hecho de aluminio, acero u otros materiales resistentes.
- Pistón: es un disco que se mueve dentro del cilindro y divide el espacio en dos cámaras. El pistón está conectado al vástago y se mueve cuando se aplica presión de aire comprimido a una de las cámaras, lo que empuja o tira del vástago para producir movimiento lineal.
- Vástago: es una varilla que se extiende desde el pistón fuera del cilindro y se conecta a la carga o al mecanismo que se va a mover. El vástago es empujado o tirado por el pistón para producir movimiento lineal.

- Sellos: son dispositivos que evitan que el aire comprimido se escape del cilindro y mantienen un sellado hermético. Los sellos se colocan alrededor del pistón y el vástago para garantizar un funcionamiento suave y eficiente del cilindro.
- Conexiones de aire: son los puntos de entrada y salida de aire comprimido en el cilindro, conectados a través de tuberías al resto del sistema neumático.

2.3.7. Componentes

Los componentes electrónicos son utilizados para la construcción de circuitos estos cumplen una alta gama de funciones que dependen de la aplicación y del tipo de circuito que se está diseñando. Estos pueden ser pasivos o activos.

2.3.7.1. Pasivos

Los componentes pasivos son dispositivos electrónicos que no requieren una fuente de energía externa para funcionar y que no tienen la capacidad de controlar activamente la corriente o la tensión en un circuito. Son fundamentales en el diseño de circuitos electrónicos y desempeñan funciones como almacenamiento de energía, dissipación de energía, filtrado de señales, entre otros.

Algunos componentes pasivos son:

- Resistencia: componente que se utiliza para limitar el flujo de corriente en un circuito. Se utilizan para controlar la corriente, reducir la tensión, dividir la tensión.
- Condensador: componente que se utiliza para almacenar energía en forma de campo eléctrico. Se utilizan para filtrar señales, acoplar señales, almacenar energía.
- Bobina o inductor: componente que se utiliza para almacenar energía en forma de campo magnético. Se utilizan para filtrar señales, acoplar señales, almacenar energía.
- Transformador: componente que se utiliza para transferir energía de un circuito a otro mediante campos magnéticos. Se utilizan para cambiar la tensión de una señal eléctrica, aislar circuitos.
- Resistor variable: un resistor cuyo valor de resistencia puede ajustarse manual o automáticamente. Se utiliza para ajustar la corriente o la tensión en un circuito.

2.3.7.2. Activos

Los componentes activos son dispositivos electrónicos que requieren una fuente de energía externa para funcionar y que tienen la capacidad de controlar la corriente o la tensión en un circuito. Estos componentes son fundamentales en el diseño de circuitos electrónicos y desempeñan diversas funciones, como amplificación de señales, conmutación de circuitos, generación de señales, entre otros.

Algunos componentes activos son:

- Transistor: dispositivo semiconductor que puede amplificar o conmutar señales electrónicas. Hay diferentes tipos de transistores, como los transistores bipolares de unión (BJT) y los transistores de efecto de campo (FET).
- Amplificador operacional (op-amp): circuito integrado que amplifica la diferencia de potencial entre dos entradas. Se utilizan en una variedad de aplicaciones, como amplificación de señales, filtrado, sumadores, entre otros.
- Circuitos integrados (IC): los circuitos integrados pueden contener una variedad de componentes electrónicos, como transistores, resistencias, condensadores, en un solo paquete. Tienen funciones específicas, como temporización, conversión de señales, control de motores.
- Diodo emisor de luz (LED): Un dispositivo que emite luz cuando se aplica una corriente eléctrica.
- Diodo de señal: un diodo semiconductor que se utiliza para rectificar señales eléctricas, es decir, convertir corriente alterna en corriente continua.
- Fotodiodo: un diodo semiconductor que convierte la luz en corriente eléctrica. Se utiliza en aplicaciones de detección de luz, como sensores de luz ambiente, contadores de luz, entre otros.

3. DIAGNÓSTICO

La implementación de un sistema hidropónico automatizado de riego basado en Arduino y Raspberry Pi en el invernadero del Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, requiere una evaluación detallada de parámetros estructurales, condiciones ambientales, disponibilidad de recursos y del sistema de riego actuales del invernadero.

Esta visita de campo es fundamental para diagnosticar el estado del invernadero y así asegurar que las instalaciones son óptimas para el cultivo hidropónico de lechugas.

Figura 30.

Visita al Centro Experimental Docente



Nota. Edificio central de Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía.
Elaboración propia.

Figura 31.

Visita el Invernadero



Nota. Entrada al invernadero con el Ing. Agr. Carlos Reynosa, Encargado del CEDA. Elaboración propia.

3.1. Objetivo de la visita de campo

El objetivo principal de la visita de campo es realizar un diagnóstico exhaustivo del invernadero para evaluar si cumple con las condiciones necesarias para la implementación del sistema automatizado de riego.

3.2. Importancia de la evaluación del invernadero

Es de suma importancia realizar este diagnóstico del invernadero debido a que es necesario saber si es viable una futura implementación de este proyecto y, en caso de no serlo, brindar las recomendaciones respectivas para que este se pueda llevar a cabo.

3.2.1. Infraestructura física

Se determinó que el invernadero está construido con acero galvanizado ensamblado, es decir, sin necesidad de utilizar soldadura, lo que permite una fácil instalación y transporte si es requerido. Tiene 10 metros de largo y 50 metros de ancho y es del tipo español, lo cual favorece a la ventilación y al reparto de iluminación dentro del invernadero. Cuando la cantidad de luz solar es muy fuerte, ambas áreas cuentan también con sarán con un mecanismo corredizo para disminuir la insolación dentro del vivero.

Figura 32.

Frente del invernadero



Nota. Vista frontal del Invernadero. Elaboración propia.

Figura 33.

Vista lateral del invernadero



Nota. Vista lateral del invernadero. Elaboración propia.

Figura 34.

Sarán para disminución de insolación dentro del invernadero



Nota. Sarán corredizo en la parte superior del invernadero. Elaboración propia.

El invernadero está separado en dos secciones de 10 metros por 25 metros que se utilizan para dos tipos de cultivos, el tradicional, por medio de tierra, y el hidropónico. En la sección de cultivo tradicional, se encuentra un cultivo de tomate por medio de goteo, en un suelo franco-arcilloso el cual es ideal para agricultura porque retiene humedad, drena exceso de agua y es fértil por naturaleza.

Figura 35.

Sección de cultivo tradicional



Nota. Sección de cultivo tradicional, se observa un cultivo de tomate por medio de goteo. Elaboración propia.

Figura 36.

Sección de cultivo hidropónico

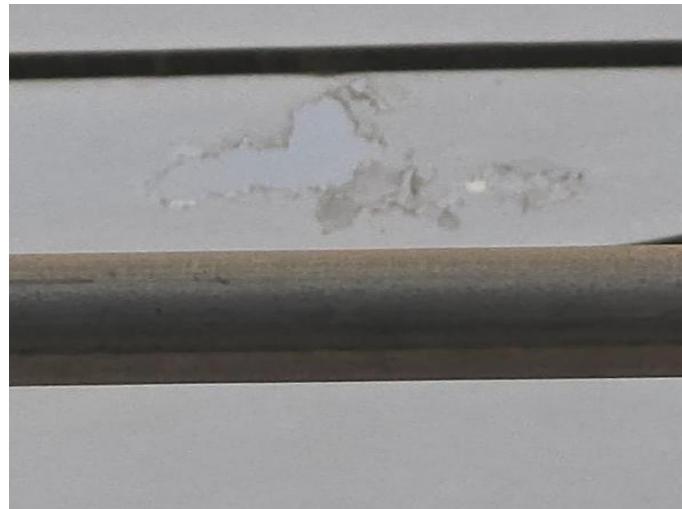


Nota. Sección de cultivo hidropónico, se observa que por el momento no existe ningún tipo de cultivo. Elaboración propia.

Cuenta con techo de nylon especial para invernaderos, para permitir únicamente el paso de la luz solar necesaria para el desarrollo de los cultivos, también para protegerlos de inclemencias climáticas o temporadas frías. Este, presenta daños en ciertos sectores debido a que aves propias del sector han abierto agujeros por donde estas pueden ingresar, lo que representa un peligro para los cultivos.

Figura 37.

Agujero en el techo del invernadero



Nota. Se observa un agujero por el cual puede ingresar agua de lluvia, insectos o inclusive aves al invernadero. Elaboración propia.

En los costados, se utiliza una malla antiáfidos 50mesh, la cual funciona como una barrera de protección ante la entrada de insectos o microorganismos que causan pérdidas de cultivos por enfermedades, plagas o ataques a las raíces. Por lo general, se encuentra en buen estado, sin embargo, hay sectores en los que se ve afectada por humedad.

Figura 38.

Malla antiáfidos



Nota. Se observa un agujero por el cual puede ingresar agua de lluvia, insectos o inclusive aves al invernadero. Elaboración propia.

Figura 39.

Daño en la malla antiáfidos



Nota. Daño en la malla debido a la humedad. Elaboración propia.

En cuanto a ventilación e iluminación del invernadero se determinó que, debido a la posición del invernadero, los cultivos no se ven afectados por la falta o exceso de ambos parámetros, pero en cuanto a la humedad, el invernadero carece del equipo necesario para ventilar y reducir la humedad de los cultivos, lo que puede provocar enfermedades debido a esta.

3.2.2. Sistema de riego

Para el sistema de riego, el CEDA cuenta con un pozo mecánico que es el encargado de suministro agua de riego al centro. La conducción del pozo va hacia un reservorio de agua tipo pileta donde se bombea a los distintos sistemas de riego.

Figura 40.

Reservorio tipo pileta



Nota. Reservorio tipo pileta y caseta para el control de las bombas que suministran el agua en el CEDA. Elaboración propia.

En el invernadero el agua se almacena en un tanque no sin antes pasar un filtro para limpiar impurezas. El tanque está conectado por medio de tubería a dos tinacos los cuales se utilizan para realizar las mezclas de fertilizantes hidrosolubles. Posteriormente se conectan a dos bombas de agua idénticas de 0.3 HP, las cuales suministran el fertilizante a los cultivos.

Figura 41.

Sistema de riego dentro del invernadero



Nota. Tanque de almacenamiento de agua proveniente del pozo tipo pileta. Elaboración propia.

Figura 42.

Filtro de agua



Nota. Filtro de agua para pozos, utilizado en sistemas de riego por goteo para evitar obstrucciones. Elaboración propia.

Figura 43.

Tinacos para realizar mezclas fertilizantes



Nota. Tinacos para la elaboración de solución nutritiva a los cultivos. Elaboración propia.

Figura 44.

Bomba de agua



Nota. Especificaciones técnicas de las bombas de agua. Elaboración propia.

Las bombas de agua son independientes y se utilizan para suministrar cada una las dos secciones en que se divide el invernadero, esto siendo controlado por un sistema de contactores y un tablero de mando. Este se activa manualmente para controlar el flujo y la frecuencia de riego. Actualmente, solamente una de las bombas está en funcionamiento y es la que se encarga del suministro del sistema de riego por goteo.

Figura 45.

Tablero de mando de las bombas de agua



Nota. Tablero de mando del sistema de riego, independiente para cada bomba. Elaboración propia.

Figura 46.
Tablero de contactores



Nota. Tablero de contactores, funcional pero falto de mantenimiento. Elaboración propia.

Si bien el sistema de riego funciona correctamente, se determinó que los tinacos utilizados para realizar las mezclas de fertilizantes están sucios por dentro, por lo que es necesaria una limpieza previa a su utilización. El tablero de contactores se encuentra deteriorado por falta de mantenimiento, pero el sistema funciona correctamente.

Figura 47.

Interior de tinacos para realizar mezclas fertilizantes



Nota. Residuos de fertilizante dentro del tinaco y manchas por falta de limpieza. Elaboración propia.

3.2.3. Condiciones ambientales

Se comprobó que dentro del invernadero no existe algún sistema de monitoreo de las condiciones ambientales como humedad, temperatura o radiación solar dentro del invernadero. Únicamente cuenta con una estación meteorológica en el exterior, pero actualmente se encuentra fuera de servicio.

Figura 48.
Estación meteorológica



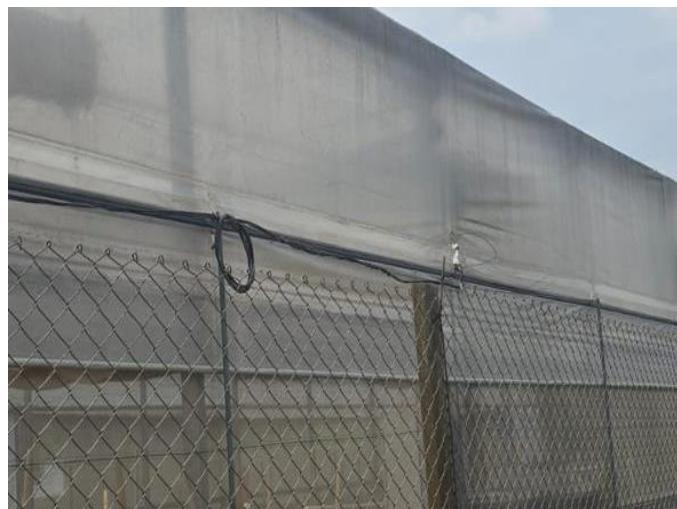
Nota. Estación meteorológica ubicada en el exterior del vivero, registra parámetros de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Elaboración propia.

3.2.4. Recursos disponibles

El invernadero cuenta con energía eléctrica estable para realizar conexiones futuras y asegurar que los componentes como Arduino y Raspberry Pi puedan funcionar sin interrupciones. El tendido eléctrico pasa por las afueras del invernadero hasta llegar a un tablero secundario ubicado en la bodega de materiales del CEDA. Este, a su vez, se conecta a una caseta de concreto, en donde se está el tablero principal, la acometida eléctrica y el contador asignado a esa área.

Figura 49.

Conductor fuera el invernadero



Nota. El conductor pasa por las afueras del invernadero hasta llegar un tablero secundario.
Elaboración propia.

Figura 50.

Tablero secundario en la bodega de materiales



Nota. Ubicación del tablero de distribución secundario dentro de la bodega de materiales.
Elaboración propia.

Figura 51.

Tablero de distribución principal



Nota. Tablero de distribución primario ubicado dentro de una caseta de concreto. Elaboración propia.

El conductor de alimentación es forrado y se encuentra en buen estado, sin embargo, en el trayecto de este, está enrollado en un árbol, lo cual no es óptimo para la distribución de energía eléctrica. El tablero secundario tiene terminales oxidados y, por ende, se ha formado sarro, influyendo esto también en la calidad de energía que llega al invernadero. El tablero principal y el contador se encuentran dentro de la caseta de concreto por lo cual se encuentran en buen estado.

Figura 52.

Conductor enrollado en árbol



Nota. Conductor soportado en árbol. Elaboración propia.

Figura 53.

Oxido y sarro en las conexiones del tablero secundario



Nota. Tablero de distribución secundario deteriorado. Elaboración propia.

Figura 54.

Contador asignado al invernadero



Nota. Contador del invernadero. Elaboración propia.

De acuerdo a lo observado dentro del invernadero hay suficiente espacio para la instalación de nuevo equipo y de los componentes necesarios para un sistema hidropónico automatizado. El área a utilizar sería de 10 m de ancho por 25 m de largo.

3.3. Beneficio del diagnóstico

Con lo observado en el diagnóstico realizado en el invernadero se encontró que sí se podría ejecutar el cultivo hidropónico automatizado de lechugas porque las condiciones actuales sí son aptas para ello con un área de 10 metros de ancho, 24 metros de largo y 12 metros de altura para ello. Gracias a este se pudieron determinar las dificultades que pueden presentarse para optimizar el diseño del cultivo.

3.3.1. Identificación de necesidades

Pese a que el invernadero, el sistema de goteo y la fuente de energía se encuentran para el desarrollo del cultivo, se identificaron ciertas necesidades específicas con base a las cuales se planificará la ejecución del proyecto. Las necesidades identificadas son:

- Condiciones estructurales: la estructura del invernadero se encuentra en estado aceptable, pero es necesaria la reparación de los agujeros en el nylon del techo al ser un ambiente controlado.
- Protocolos de bioseguridad: el invernadero no posee señalización respecto a los protocolos de bioseguridad que las personas deben tener al ingresar al mismo. Dado que un cultivo hidropónico debe estar libre de

insectos, microorganismos o patógenos que puedan infectar el agua o las plantas, estos son de suma importancia.

- Diseño del sistema hidropónico: el invernadero únicamente posee el espacio necesario para implementar un cultivo hidropónico más no la infraestructura necesaria, por lo que es necesario el diseño de la base de este.
- Optimización del sistema de riego: el sistema de riego cuenta con bombas de agua, mangueras de riego y un sistema de contactores que se operan manualmente, pero no tiene un temporizador para que funcione automáticamente. Además, las mangueras están dañadas por el uso y presentan fugas en algunas secciones. Asimismo, es necesario realizar trabajos de limpieza en los tinacos para fertiriego y en el tablero de contactores.
- Sistema de monitoreo de datos: como se determinó anteriormente, no existe un sistema de registro de datos ambientales dentro del invernadero y este es de vital importancia para un sistema hidropónico, por lo cual es necesario la implementación de uno.
- Suministro de energía eléctrica: el invernadero no cuenta con una planta de emergencia que se active al momento de un apagón o alguna contingencia. Debido a que el sistema es automático, el suministro de energía eléctrica debe ser constante en todo momento.

4. MARCO METODOLÓGICO

4.1. Descripción

El proyecto de tesis se centrará en la creación de un sistema embebido que utilice Raspberry Pi y Arduino para automatizar y optimizar el cultivo hidropónico de lechugas. Este sistema buscará mejorar la eficiencia del uso de recursos, reducir la intervención humana y maximizar la producción, al mismo tiempo que proporciona una herramienta educativa valiosa para los estudiantes de agronomía. La implementación y evaluación de este sistema en el Centro Experimental Docente ofrecerán conocimientos prácticos sobre las ventajas y desafíos de integrar tecnología avanzada en la agricultura moderna.

4.1.1. Justificación

La automatización en procesos de producción agrícola proporciona beneficios como la eficiencia, la reducción de errores, el ahorro de costos, seguridad, flexibilidad, mejora en la seguridad alimentaria, entre otras cosas. Es por ello que, en la actualidad, la automatización provoca atracción para muchas aplicaciones en la industria.

Los cultivos por hidroponía ofrecen diversas ventajas a comparación de los métodos de cultivo tradicionales en el suelo. Estas incluyen mayor producción por unidad de superficie, utilización más eficiente del agua y nutrientes, un control más preciso del ambiente de crecimiento de plantas y la posibilidad de cultivar en distintas ubicaciones, no solo al aire libre, sino también en interiores y entornos urbanos.

Desarrollar un sistema de automatización de cultivos hidropónicos es importante porque optimiza el uso de recursos, permitiendo uso más eficiente de agua, nutrientes y energía al controlar la entrega de los mismos a las plantas, controla con mayor precisión el entorno de cultivo para tener a la planta desestresada y monitorea de forma remota el control de los sistemas de los cultivos a través de dispositivos móviles o computadoras. Todo esto hace que la automatización de un cultivo hidropónico sea una herramienta para los productores y maximizar la eficiencia y rentabilidad de sus cultivos.

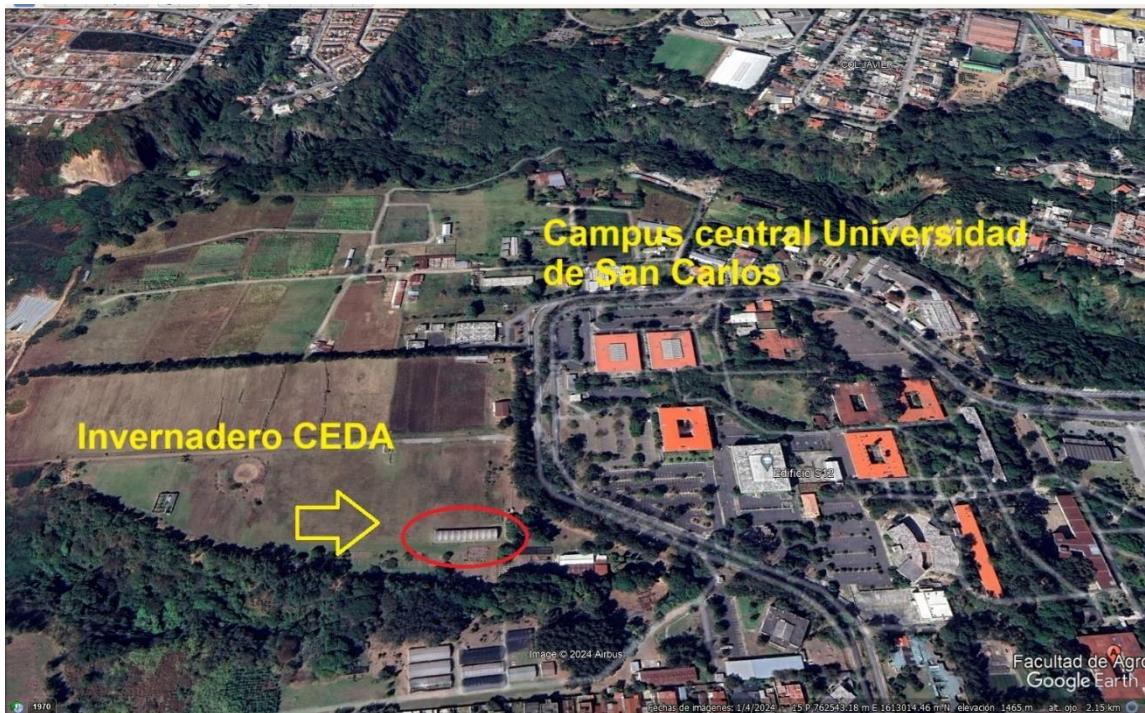
Diseñar el sistema de automatización del cultivo hidropónico en el Centro Experimental Docente de Agronomía, además de brindar todas las ventajas que conlleva la automatización de un cultivo hidropónico, serviría de referencia para docentes y/o estudiantes que deseen implementar tanto un sistema de cultivo hidropónico propio o bien, implementar un sistema de automatización realizando las modificaciones que se ajusten a sus necesidades.

4.2. Localización

El invernadero se encuentra localizado en la ubicación geográfica 14°35'11" latitud y 90°35'58" longitud Oeste a una altitud promedio de 1,502 metros sobre el nivel del mar.

Figura 55.

Localización CEDA, Facultad de Agronomía



Nota. Se observa el área donde se encuentra el invernadero. Obtenido de Google (2024). *Ubicación del área en estudio.* [Fotografía aérea]. Google Earth Pro. Consultado el 11 de marzo de 2024. Recuperado de Lansat/Copernicus 2024 INEGI

4.2.1. Descripción del lugar

El CEDA, se ubica en la Ciudad Universitaria, Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12, ciudad capital y colinda con la Colonia Villa Sol. Cuenta con una extensión de 22,38 hectáreas, donde se observan áreas de uso forestal, apícola y agrícola, además de campos de cultivo, invernaderos y umbráculos.

Figura 56.

Descripción de la ubicación del CEDA



Nota. Colindancias del CEDA, Facultad de Agronomía. Obtenido de Google (2024). *Ubicación del área en estudio. [Fotografía aérea]*. Google Earth Pro. Consultado el 11 de marzo de 2024. Recuperado de Lansat/Copernicus 2024 INEGI

4.2.2. Consideraciones ambientales

Según el INSIVUMEH, las condiciones climáticas registradas en el área del CEDA son:

- Precipitación media anual: 1,216.22 milímetros distribuidos en 110 días en los meses de mayo a octubre.
- Temperatura media anual: 18.3 °C
- Humedad media relativa: 79 %

- Insolación promedio: 6.65 horas/día
- Radiación: 0.33 cal/cm²/min

4.3. Delimitación del campo de estudio

Realizar la delimitación del campo de estudio es fundamental para garantizar que el diseño de automatización de cultivo hidropónico propuesto sea de buena calidad, relevante y viable. Además, brinda claridad, enfoque y dirección al desarrollo del proyecto.

4.3.1. Alcance del proyecto

El sistema de automatización pretende controlar el ciclo continuo de suministro de solución nutritiva a las raíces de las lechugas Simpson, así como el monitoreo y registro de datos de las variables climatológicas dentro del invernadero y la corrección de las mismas.

4.3.2. Restricciones del proyecto

El diseño de automatización únicamente está diseñado para el suministro de agua y solución nutritiva a las raíces de los cultivos, no para realizar mediciones y correcciones de los niveles de pH y oxigenación en la solución nutritiva. Esto debido a que tiene que hacerse con gran precisión y conocimiento para evitar que el cultivo se muera.

Para el mantenimiento del sistema también se requiere intervención manual, ya que los canales por donde circula la solución necesitan limpieza de forma periódica. Además, el sistema de bombeo debe estar correctamente

calibrado para que no se saturen las raíces de las lechugas, o bien, se sequen, por no contar con los tiempos de activación adecuados.

4.4. Tipo de cultivo hidropónico

Como modalidad de cultivo hidropónico, se seleccionó el sistema NFT (*Nutrient Film Technique*) debido a sus numerosas ventajas:

- Eficiencia en el uso del agua y nutrientes: en este método, una película delgada de solución nutritiva recircula continuamente, suministrando directamente a las raíces de las plantas los nutrientes necesarios, reduciendo el desperdicio de agua y un control más preciso sobre la composición nutritiva que reciben las lechugas.
- Crecimiento rápido y rendimiento elevado: al ser un sistema hidropónico los cultivos crecen más rápido que aquellos cultivados en suelo, lo que permite cosechas más frecuentes y un rendimiento elevado.
- Control de condiciones ambientales: los cultivos NFT pueden llevarse a cabo en entornos controlados, como invernaderos, lo que permite mantener condiciones óptimas de temperatura, humedad y luz, reduciendo la dependencia de las condiciones climáticas externas y disminuyendo la incidencia de plagas y enfermedades.
- Espacio y flexibilidad: son adecuados para áreas con espacio limitado porque pueden diseñarse en configuraciones verticales u horizontales, optimizando el uso del espacio disponible.

- Sostenibilidad y reducción del impacto ambiental: la hidroponía en general, y el sistema NFT en particular, son métodos de cultivo más sostenibles en comparación con la agricultura convencional. Al usar menos agua y eliminar la necesidad de pesticidas y herbicidas, se reduce significativamente el impacto ambiental. Además, la producción local en sistemas hidropónicos puede disminuir la huella de carbono asociada con el transporte de alimentos.

Figura 57.

Cultivo NFT de lechuga



Nota. Cultivo NFT. Obtenido de Universidad Nacional Agraria La Molina (s.f.). *Cultivo de lechuga en sistema NFT horizontal – con módulos de ocho canales de cultivo de 9 m de largo.* (<http://www.lamolina.edu.pe/hidroponia/sistemaNFT.htm>), consultado el 27 de julio de 2024 Derechos de autor por Universidad Nacional Agraria La Molina.

4.5. Tipo de lechuga

En el contexto de cultivo hidropónico, la lechuga de hoja suelta, particularmente la variedad lechuga Mantequilla, es considerada una de las más fáciles de cultivar debido a las siguientes razones:

- Requerimientos nutricionales moderados: posee requerimientos nutricionales relativamente bajos en comparación a otras variedades, por lo que no necesita concentraciones altas de nutrientes para crecer bien. Su solución nutritiva típica contiene niveles equilibrados de macronutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así como micronutrientes como hierro (Fe), magnesio (Mg) y calcio (Ca).
- Tolerancia a las variaciones en el pH y la conductividad eléctrica: es bastante tolerante a las variaciones en el pH del agua de la solución nutritiva, prosperando en un rango de pH de 5,5 a 6,5. También tolera fluctuaciones en la conductividad eléctrica permitiendo un margen de error más amplio.
- Crecimiento rápido y constante: esta variedad de lechuga tiene un ciclo de crecimiento rápido, generalmente lista para la cosecha en 45 a 55 días desde la siembra.
- Requerimientos de luz moderados: no tiene necesidades extremas de luz y puede crecer bien con luz solar indirecta en invernaderos.
- Resistencia a plagas y enfermedades: en un sistema hidropónico, los cultivos son menos susceptible a plagas y enfermedades que en el

cultivo tradicional en suelo, debido al ambiente controlado y la reducción del contacto con el suelo.

Figura 58.

Lechuga mantequilla



Nota. Imagen de la lechuga tipo mantequilla. Obtenido de La huerta Exprés (s.f.). *Lechuga Mantequilla*. (<https://lahuertaexpressgt.com/product/lechuga-mantequilla/>), consultado el 10 de marzo de 2024. De dominio público.

4.6. Materiales a utilizar

Para realizar el diseño embebido utilizando Raspberry Pi y Arduino para el cultivo hidropónico de lechugas, se seleccionaron los materiales y componentes a continuación

4.6.1. Tubería PVC de 2" clase 100 PSI

Se utiliza tubería PVC de 2" clase 100 PSI que servirán de canales para entregar la solución nutritiva a las raíces de las lechugas. Su durabilidad y resistencia a la corrosión la hacen ideal para este propósito.

Tabla 11.*Especificaciones técnicas tubería PVC 2"*

Característica	Especificación
Diámetro nominal	2 pulgadas (50 mm aproximadamente)
Diámetro externo	60.3 mm
Diámetro interno	50 mm
Espesor de pared	3.2 mm
Presión nominal	100 PSI
Material	Policloruro de vinilo
Instalación	Mediante pegamento de acoples

Nota. Especificaciones técnicas básicas de tubería PVC de 2" clase 100PSI. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 59.

Tubería PVC 2" clase 100 PSI



Nota. Tubería. Obtenido de Allegro Central Vacuum Systems (s.f.). *Tubería PVC 2" clase 100 PSI.* (<https://www.allegrovacuums.com/es/white-aerus-2-inch-central-vacuum-pvc-pipe-box-of-80-foot.html>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.2. Microtubos para riego localizado

Se utilizan para distribuir el agua y los nutrientes directamente a las raíces de las plantas. Su pequeño diámetro permite un control preciso del flujo de agua.

Tabla 12.

Especificaciones técnicas microtubos de 6mm

Característica	Especificación
Diámetro nominal	6 mm
Diámetro interno	4mm
Espesor de pared	1 mm
Presión nominal	100 PSI
Material	Policloruro de vinilo
Instalación	Generalmente mediante acoplamientos o adaptadores
Flexibilidad	Alta

Nota. Especificaciones técnicas básicas de microtubos PVC de 6 mm clase 100PSI para riego localizado. Elaboración propia con Excel.

Figura 60.

Microtubo de 6 mm



Nota. Microtubo. Obtenido de Viagua (s.f.). *Microtubos de 6 mm clase 100 PSI para riego localizado.* (<https://viagua.es/material-rieego/microtubo-6-mm/>), consultado el 27 de julio de 2024.

De dominio público.

4.6.3. Madera tratada

La madera tratada se utiliza para construir el soporte y la estructura del sistema hidropónico. Es resistente a la humedad y garantiza una base sólida y estable para el sistema.

Tabla 13.

Especificaciones técnicas madera tratada

Característica	Especificación
Tipo de tratamiento	Impregnación con preservantes químicos
Resistencia a la corrosión	Alta, protege contra la descomposición, hongos e insectos
Durabilidad	Alta, adecuada para exteriores e instalaciones en contacto con el suelo
Dimensiones	3" de largo por 2" de ancho
Resistencia al agua	Alta, adecuada para condiciones húmedas
Instalación	Métodos y herramientas estándar

Nota. Especificaciones técnicas básicas de la madera tratada. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 61.

Madera tratada



Nota. Madera. Obtenido de Maderas y Machihembres (s.f.). *Madera tratada*. (<https://hagaloconmadera.com/>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.4. Bomba de agua centrífuga

La bomba de agua es crucial para el sistema de riego del cultivo hidropónico. Una bomba de 0,5 HP proporciona la presión y el flujo necesarios para distribuir el agua y los nutrientes de manera uniforme a todas las plantas. Su integración con el sistema de control garantiza un suministro adecuado según las necesidades detectadas por los sensores.

Tabla 14.

Especificaciones técnicas bomba de agua centrífuga

Característica	Especificación
Potencia	0,5 HP
Tipo de bomba	Centrífuga
Caudal	200 Litros/minuto
Altura máxima	10 metros
Presión máxima	2 bars
Velocidad de funcionamiento	Entre 1 450 y 2 900 RPM
Eficiencia	Entre 50 % a 75 %
Rango de temperatura	Entre 0 °C a 60 °C

Nota. Especificaciones técnicas básicas de una bomba de agua centrífuga de 0,5 HP. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 62.

Bomba de agua centrífuga



Nota. Bomba de agus. Obtenido de Aquasistemas (s.f.). *Bomba de agua centrífuga de 0.5 HP.* (<https://aquasistemas.com.gt/tienda/bombas-para-agua/bomba-centrifuga/bomba-para-agua-centrifuga-little-giant-1-2-hp-lcp-05/>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.5. Tubería PVC de 1/2" clase 100 PSI

Se utiliza tubería PVC de 1/2" clase 100 PSI que servirán para el transporte y recirculación de solución nutritiva en el cultivo hidropónico

Tabla 15.

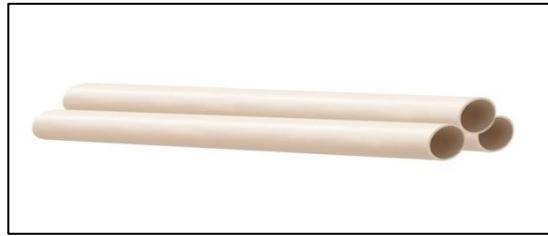
Tubería PVC de 1/2" clase 100 PSI

Característica	Especificación
Diámetro nominal	1/2 pulgada (12.7 mm aproximadamente)
Diámetro externo	21.3 mm
Diámetro interno	15.9 mm
Espesor de pared	2.0 mm
Presión nominal	100 PSI
Material	Policloruro de vinilo
Instalación	Mediante pegamento de acoples

Nota. Especificaciones técnicas básicas de tubería PVC de 1/2" clase 100PSI. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 63.

Tubería PVC de 1/2" de clase 100 PSI



Nota. Tubería. Obtenido de Novex (s.f.). *Tubería PVC de 1/2" clase 100 PSI.* (<https://www.novex.com.gt/producto/15482/Tubo-pvc-315-psi-1%7C2-in.html>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.6. Filtro de agua

El filtro de sedimentos se incluye para asegurar que el agua utilizada en el sistema esté libre de impurezas que puedan obstruir los microtubos y afectar la salud de las plantas. Esto es crucial para mantener la eficiencia y la longevidad del sistema de riego.

Tabla 16.

Especificaciones técnicas filtro de sedimentos

Característica	Especificación
Mesh (Malla)	120 mesh
Material del filtro	Acero inoxidable, poliésteres, polipropileno, entre otros
Tamaño de partícula filtrada	125 micrómetros
Presión máxima de operación	150 psi
Temperatura máxima de operación	Entre 60 °C a 80 °C
Tipo de montaje	En línea, en serie, entre otros.

Nota. Especificaciones técnicas básicas de un filtro de sedimentos 120 mesh. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 64.

Filtro de sedimentos



Nota. Filtros. Obtenido de Aqupla (s.f.). *Filtro para sedimentos 120 mesh.* (<https://aqupla.com/products/106705>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.7. Arduino Uno

Se seleccionó la placa Arduino Uno para la automatización del sistema de riego del cultivo hidropónico de lechuga dado a que es ideal debido a su capacidad de procesamiento, facilidad de programación y amplia comunidad de soporte. Su función principal es recibir las lecturas de los sensores y activar los actuadores según las necesidades del cultivo. La Arduino Uno es ideal debido a su capacidad de procesamiento, facilidad de programación y amplia comunidad de soporte.

Tabla 17.*Características técnicas Arduino Uno*

Característica	Especificación
Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límites)	6-20 V
Pines E/S digitales	14 (6 con salida PWM)
Pines PWM E/S digitales	6
Pines análogos de entrada	6
Corriente DC por pin E/S	20 mA
Corriente DC para pin 3.3V	50 mA
Memoria flash	32 kB
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Velocidad de reloj	16 MHz
Pin_LED	13
Longitud	68.8 mm
Ancho	53.4 mm
Peso	25 g

Nota. Especificaciones técnicas Arduino Uno Rev3. Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Uno Rev3.* (<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/>), consultado el 11 de marzo de 2024. De dominio público.

Figura 65.

Arduino Uno



Nota. Arduino. Obtenido de Arduino Store (s.f.). *Arduino Uno Rev3*. (<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>). Consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.8. Raspberry Pi 3 Model B

Se seleccionó La Raspberry Pi 3 Model B para el diseño de un sistema de monitoreo de condiciones climatológicas dentro del invernadero con las funciones de recopilación de datos, la interfaz de usuario y el almacenamiento de información.

Tabla 18.

Características técnicas Raspberry Pi 3 Model B

Característica	Especificación
Procesador	Bradcom BCM2837, 12 GHz
Núcleos	4
Memoria RAM	1 GB
Conectividad	Wi-Fi 802.11b/g/b, Bluetooth 4.1
Ethernet	Sí

Continuación de la Tabla 18.

Característica	Especificación
Puertos USB	4 puertos USB 2.0
Puerto HDMI	Sí
Conector para cámara	Sí
Conector de pantalla	Sí
GPIO	40 pines GPIO
Almacenamiento	Ranura para tarjeta microSD
Dimensiones	85 mm x 56 mm

Nota. Especificaciones básicas de la Raspberry Pi 3 Model B Series. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 66.

Raspberry Pi 3 Model B



Nota. Se seleccionó para el diseño de un sistema de monitoreo de condiciones climatológicas dentro del invernadero Obtenido de Raspberry Pi (s.f.). *Raspberry Pi 3 Model B.* (<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.9. Módulo de reloj en tiempo real (RTC)

Proporciona una referencia de tiempo precisa y constante, crucial para llevar a cabo tareas programadas, como el riego y la iluminación. El módulo DS3231 RTC asegura que las acciones se realicen a intervalos regulares, optimizando las condiciones de crecimiento de las lechugas.

Tabla 19.

Especificaciones técnicas Módulo DS3231 RTC

Característica	Especificación
Fuente de alimentación	3.3 V a 5 V
Precisión	+/- 1 minuto por año a 25 °C
Rango de temperatura	De -40 °C a 85 °C
Formato	Año, mes, día, hora, minuto, segundo
Configuración	Mediante comandos I2C

Nota. Especificaciones básicas del Módulo DS3231 RTC. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 67.

Módulo DS3231 RTC



Nota. Modulo. Obtenido de La Electrónica (s.f.). Módulo Reloj RTC DS3231. (<https://laelectronica.com.gt/modulo-de-reloj-rtc-ds3231>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.10. Pantalla LCD I2C

La pantalla LCD permite al usuario monitorear el estado del sistema en tiempo real. A través de esta interfaz, se puede visualizar información relevante como la temperatura, humedad, horarios de riego y otros parámetros esenciales. La comunicación I2C simplifica la conexión y reduce el número de pines necesarios para su funcionamiento.

Tabla 20.

Especificaciones técnicas pantalla LCD I2C

Característica	Especificación
Tipo de pantalla	LCD (<i>Liquid Crystal Display</i>) con interfaz I2C
Tamaño de pantalla	16x2
Número de caracteres	16 caracteres por 2 líneas
Voltaje de operación	3.3 V o 5 V
Rango de temperatura	0 °C a 50 °C

Nota. Especificaciones básicas de una pantalla LCD I2C. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 68.

Pantalla LCD I2C



Nota. Pantalla LCD. Obtenido de TETTSA (s.f.). Pantalla LCD 16x2 I2C. (<https://tienda.tettsa.gt/producto/lcd-16x2v-i2c/>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.11. Sensor de humedad y temperatura

Para realizar las mediciones de humedad y temperatura se utilizará el sensor DHT11. Estos datos son fundamentales para mantener las condiciones óptimas de cultivo. La Arduino utiliza las lecturas del DHT11 para tomar decisiones informadas sobre la activación de la bomba de agua y otros actuadores.

Tabla 21.

Especificaciones básicas sensor DHT11

Característica	Especificación
Rango de temperatura	0 °C a 50 °C
Precisión de temperatura	+/- 2 °C
Rango de humedad	20 % a 80 % Humedad Relativa
Precisión de humedad	+/- 5 %
Tiempo de respuesta	1 segundo
Voltaje de operación	3.3 V a 5 V
Pines del sensor	VCC (alimentación); GND (tierra); DATA (datos)

Nota. Especificaciones básicas de un sensor de humedad y temperatura DHT11. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 69.

Sensor DHT11



Nota. Sensor. Obtenido de TETTSA (s.f.). Sensor DHT11. (<https://tienda.tettsa.gt/producto/sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11/>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

4.6.12. Módulo de relé 2CH

Los relés son esenciales para controlar dispositivos de mayor potencia, como la bomba de agua. El módulo de relé 2 CH permite activar y desactivar estos dispositivos según las órdenes recibidas por la Arduino Uno o Raspberry Pi 3 Model B, garantizando un control eficiente y seguro.

Tabla 22.

Especificaciones técnicas del módulo de relé 2CH

Característica	Especificación
Número de canales	2 relés independientes
Voltaje de control de la señal	3.3 V o 5 V
Voltaje de operación del relé	5 V
Voltaje máximo de entrada	250 VAC o 30 VDC
Corriente máxima de entrada	10 A en CA o CC
Tipo de relé	Electromecánico

Continuación de la Tabla 22.

Característica	Especificación
Tipo de contactos	Normalmente abierto (NO); Normalmente cerrado (NC); Común (COM)
Interfaz de control	Pines de entrada para control de relés (IN1, IN2) y pines de alimentación (VCC, GND)

Nota. Especificaciones básicas de un módulo de relé 2 CH. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 70.

Módulo de relé 2 CH



Nota. Relé. Obtenido de La Electrónica (s.f.). *Módulo de relé 2 CH*. (<https://laelectronica.com.gt/modulo-rele-5v-2-canales>), consultado el 27 de julio de 2024. De dominio público.

5. DISEÑO PROPUESTO

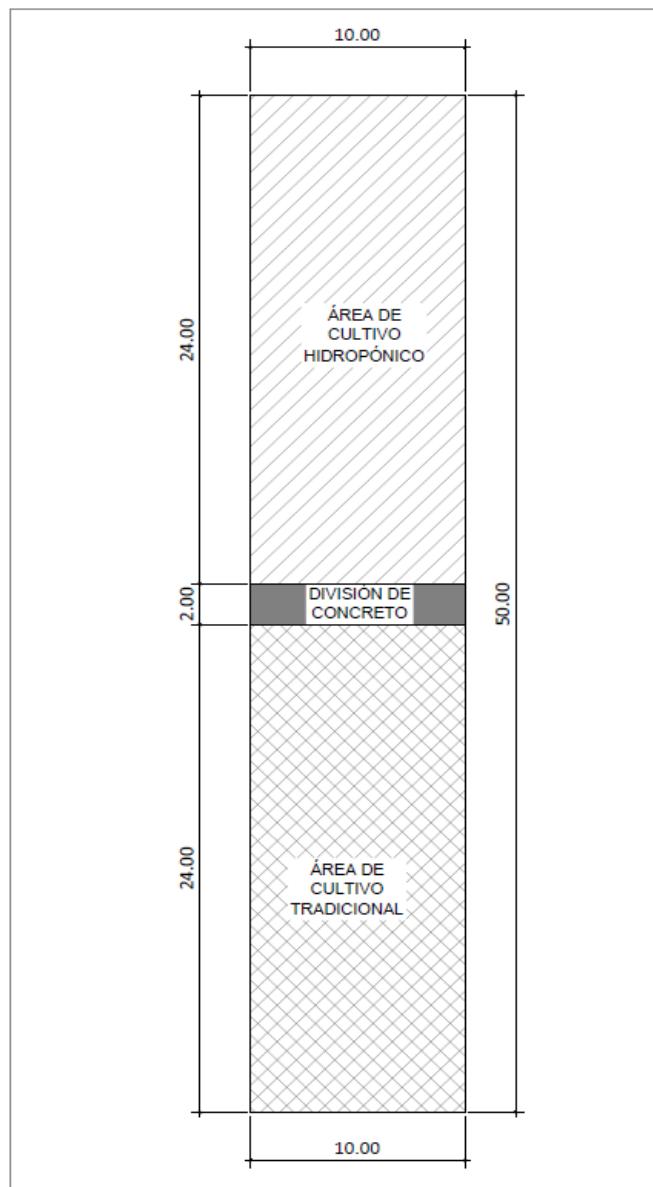
En este capítulo se propone el diseño del tipo de cultivo hidropónico para lechuga mantequilla y, además, los diseños de automatización del sistema de control de bombeo de agua del cultivo y un sistema de control de monitoreo de condiciones climatológicas.

5.1. Diseño propuesto para el cultivo NFT de lechuga mantequilla

Para el diseño del cultivo NFT de lechugas mantequilla, se proponen los diseños de los módulos hidropónicos con su respectivo sistema de riego, acoplándose al área disponible.

Figura 71.

Distribución de espacios actuales en el invernadero



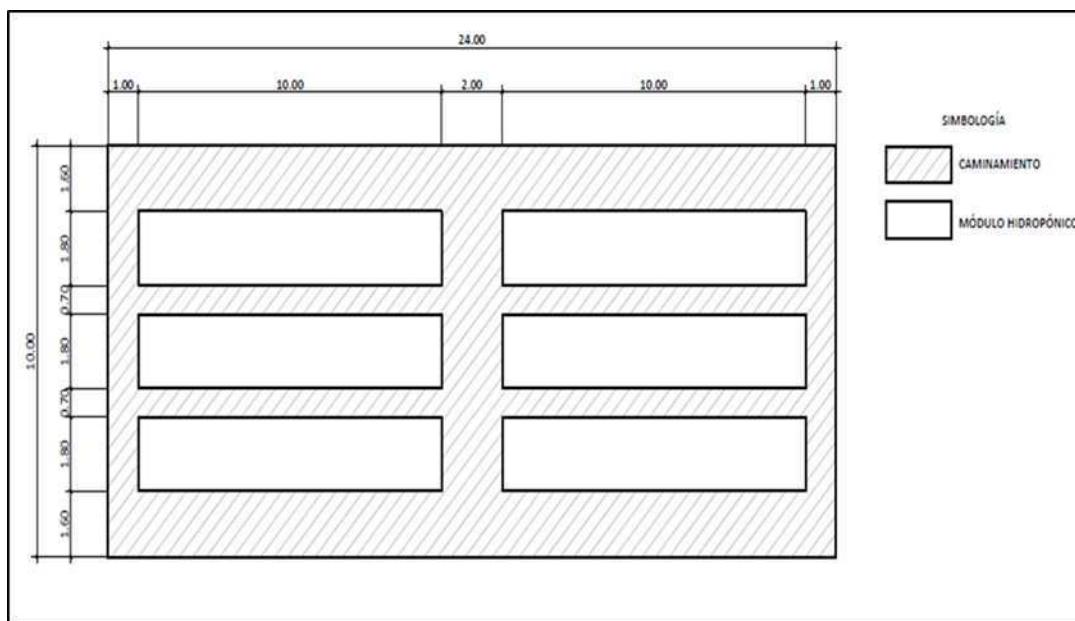
Nota. Distribución actual del invernadero del Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Elaboración propia, realizado con AutoCAD.

5.1.1. Módulos hidropónicos

Se propone el uso de seis (6) módulos de 1,80 metros de ancho por 10 metros de largo cada uno, fabricados con tubería PVC de 2" soportados en bases tipo marco de madera tratada con separación de 1,5 metros. Los módulos serán de 8 tubos de PVC con una separación de 20 centímetros entre ellos.

Figura 72.

Propuesta de distribución de módulos hidropónicos



Nota. Distribución propuesta para el desarrollo del cultivo hidropónico NFT. Elaboración propia, realizado con AutoCAD.

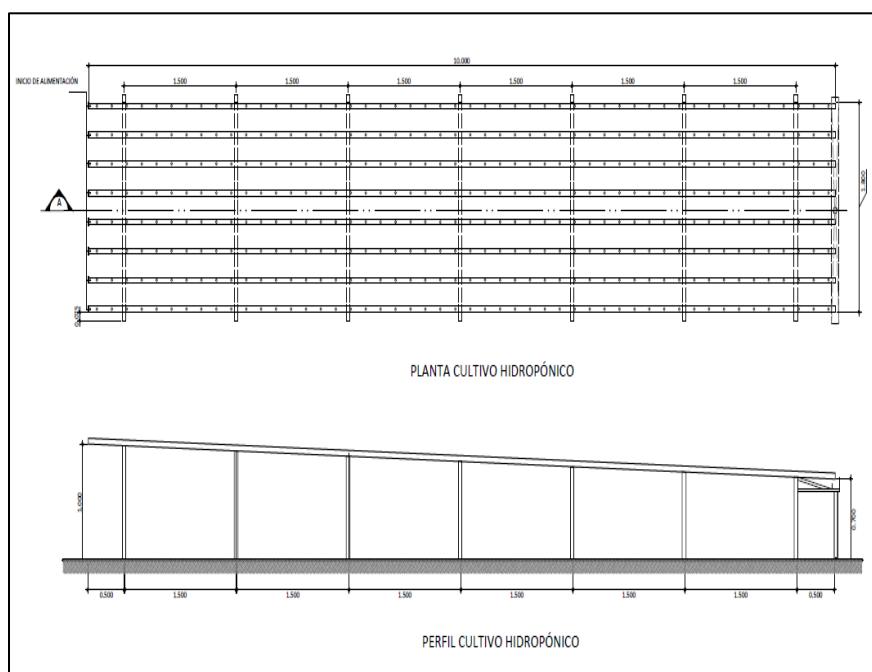
Los módulos tendrán una altura de 1,0 metros en la parte más alta y una altura de 0,70 metros en su parte más baja, lo cual representa una pendiente del 3 % ideal para este tipo de cultivos hidropónicos.

Al final de cada módulo habrá una canaleta de 3" pulgadas con pendiente hacia el centro con un agujero de 2" pulgadas al centro para la recolección de la solución nutritiva y su recirculación.

Cada tubo tendrá un agujero de 6 milímetros en el extremo que se encuentra a mayor altura y luego tendrá agujeros de 1" pulgada a cada 20 centímetros, donde irán colocadas las lechugas soportadas por una canastilla que permita el flujo de solución nutritiva en las raíces de las mismas.

Figura 73.

Diseño de módulos hidropónicos



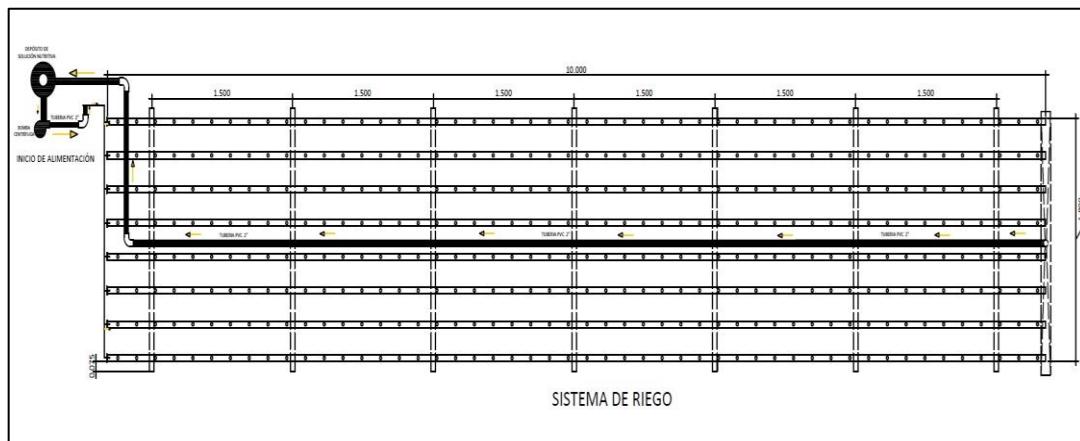
Nota. Propuesta de módulos NFT, de tubería PVC de 2" y soporte de madera tratada 3"x2".
Elaboración propia, realizado con AutoCAD.

5.1.2. Sistema de riego

Para el sistema de riego se propone la utilización de una bomba centrífuga de 0,5 HP con su respectivo filtro de sedimentos, con tubería principal de 2" y microtubos de 6mm para el suministro de solución nutritiva a cada uno de los tubos de cada módulo. La bomba extrae solución nutritiva del depósito y la traslada por medio de los microtubos a los canales del módulo hidropónico. Esta se recolecta en la parte final del módulo y regresa por medio de tubería ubicada debajo del módulo para su recirculación.

Figura 74.

Diseño del sistema de riego



Nota. Propuesta de diseño del sistema de riego. Elaboración propia, realizado con AutoCAD.

5.2. Diseño propuesto del sistema automatizado de control de bombas de agua en el entorno Arduino

El alcance principal del diseño propuesto del sistema automatizado de control de bombas de agua en un cultivo hidropónico en el entorno Arduino es

desarrollar un sistema automatizado de riego basado en la plataforma Arduino para cultivos hidropónicos. Este sistema tiene como finalidad optimizar el riego en el cultivo NFT, específicamente en el cultivo de lechugas Simpson, utilizando un microcontrolador programable Arduino que permite activar y desactivar una bomba de agua en tiempos determinados de acuerdo a la etapa de crecimiento de la lechuga.

5.2.1. Esquema de funcionamiento

El sistema está diseñado para realizar riegos programados basados en el tiempo y las condiciones del cultivo utilizando un módulo RTC. Se establece un horario de riego que se ajusta según las necesidades del cultivo acorde a la etapa de crecimiento de la lechuga. La bomba de agua se activa y desactiva automáticamente según estos horarios, lo que permite un riego preciso y eficiente.

Los componentes a utilizar son los siguientes:

- Placa Arduino Uno: el corazón del sistema, encargada de procesar la información y controlar los diferentes componentes.
- Módulo de reloj en tiempo real (RTC): permite llevar un control preciso del tiempo para programar los ciclos de riego.
- Pantalla LCD I2C: facilita la visualización de parámetros y estados del sistema en tiempo real.
- Sensor de humedad y temperatura DHT11: monitoriza las condiciones ambientales dentro del invernadero.

- Relé: actúa como interruptor para la bomba de agua.
- Bomba de agua: responsable de suministrar el agua a los cultivos.
- Fuente de alimentación: la encargada de suministrar energía eléctrica a la bomba de agua.

5.2.2. Diagrama de flujo

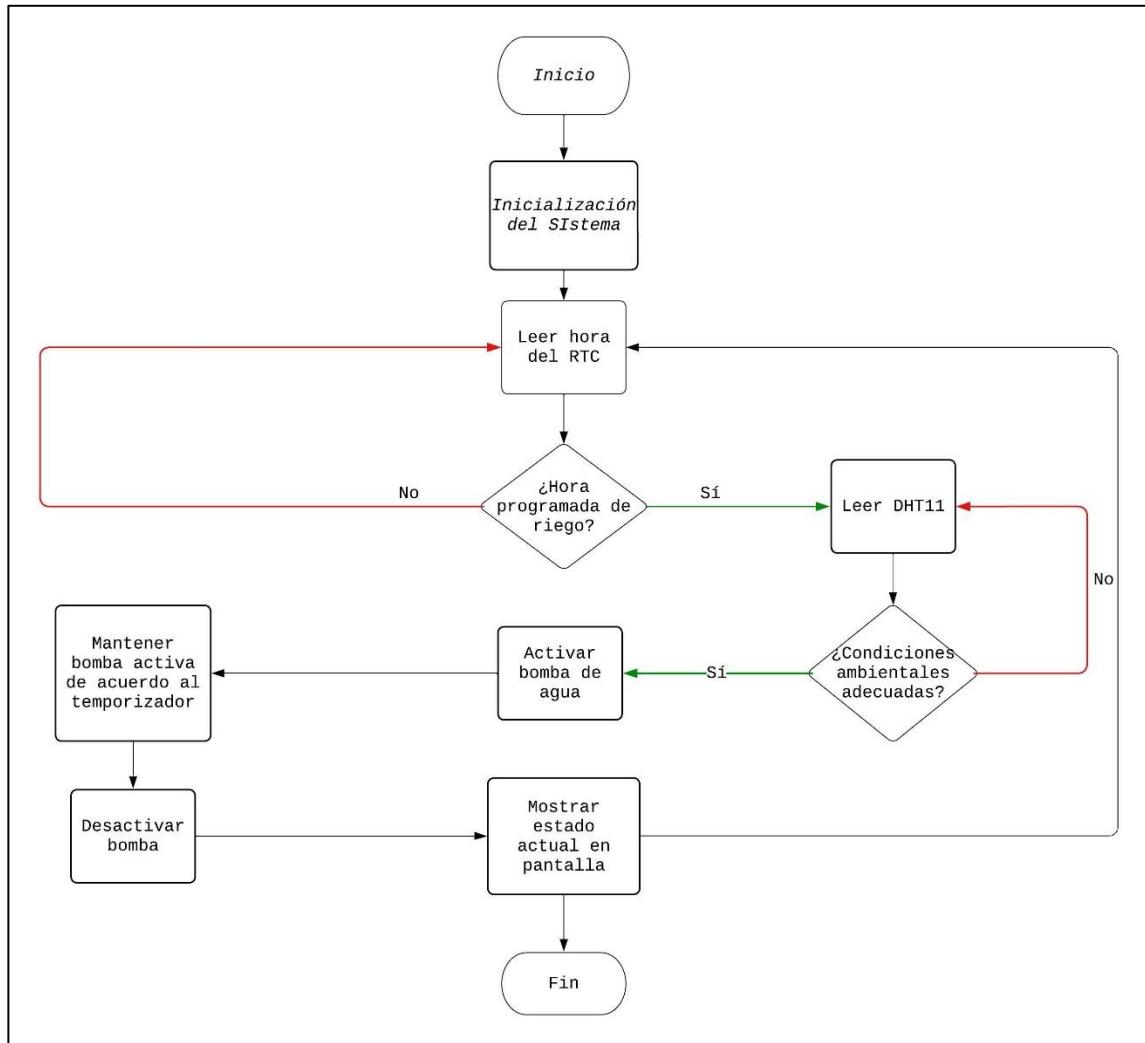
Descripción del diagrama de flujo:

- Inicio
- Inicialización del sistema
 - Configuración de placa Arduino
 - Configuración del módulo RTC
 - Inicialización de pantalla LCD I2C
 - Inicialización del sensor DHT11
- Leer hora actual del RTC
- ¿Es la hora programada para riego?
 - No: Volver a leer la hora del RTC
 - Sí: Continuar al paso siguiente
- Leer sensor DHT11
- ¿Son las condiciones ambientales adecuadas?
 - No: Volver a leer el sensor DHT11

- Sí: Continuar al paso siguiente
- Activar la bomba de agua
- Mantener la bomba activada durante el tiempo programado
- Temporizador para tiempo de riego
- Desactivar bomba de agua
- Mostrar estado actual en pantalla LCD
- Volver a leer la hora actual del RTC
- Fin

Figura 75.

Diagrama de flujo del sistema automatizado de control de bombas de agua



Nota. Representación de los procesos y toma de decisiones del sistema automatizado de control de bombas de agua. Elaboración propia, realizado con Lucid.

5.2.3. Diagrama de conexiones

Para realizar el diagrama de conexiones del diseño del sistema automatizado de control de bombas de agua en cultivo hidropónico en el entorno Arduino, se realizaron las siguientes conexiones

Tabla 23.

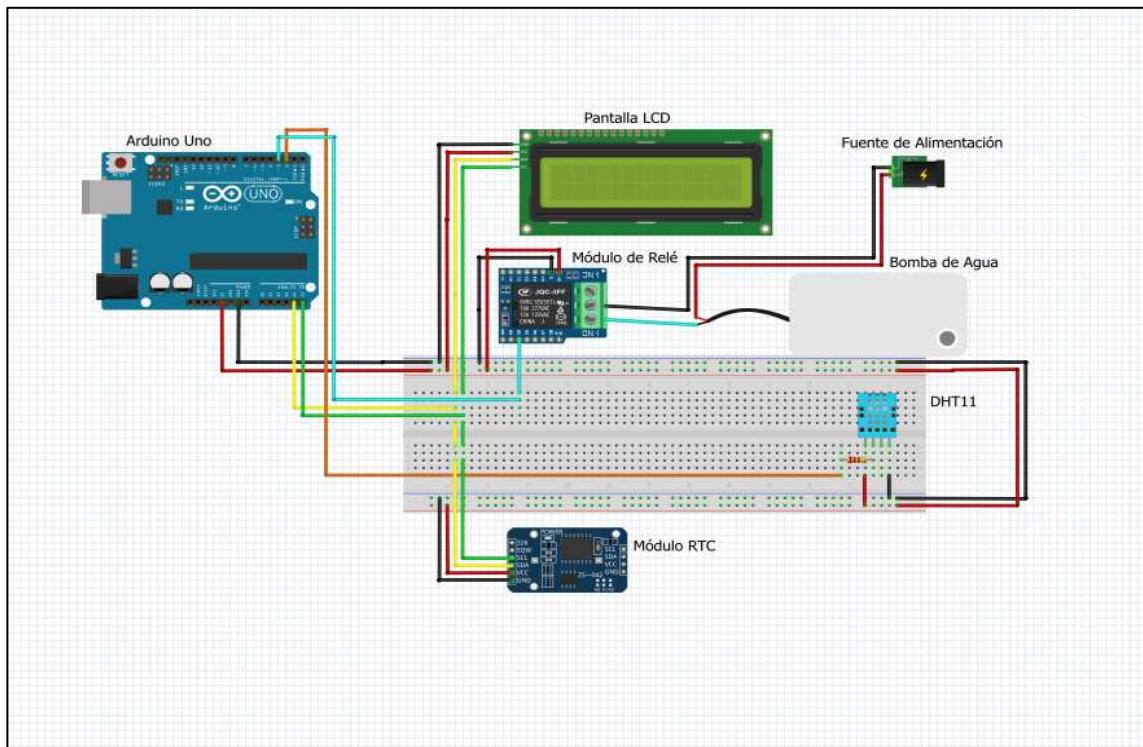
Conexiones para el sistema de bombas automatizado en Arduino

CONEXIONES			
Pines Módulo RTC	VCC	5V	Pines Arduino Uno
	GND	GND	
	SDA	A4	
	SCL	A5	
Pines Pantalla LCD	VCC	5V	Pines Arduino Uno
	GND	GND	
	SDA	A4	
	SCL	A5	
Pines Sensor DHT11	VCC	5V	Pines Arduino Uno
	GND	GND	
	DATA	D2	
Pines Relé	VCC	5V	Pines Arduino Uno
	GND	GND	
	D0	D3	
	Común (COM)	GND	Fuente externa
Normalmente abierto (NO)		GND	Bomba de agua
Bomba de Agua	VCC	VCC	Fuente externa
	GND	Normalmente abierto (NO)	Relé

Nota. Conexiones físicas de los componentes a utilizar con Arduino Uno y una fuente de alimentación externa. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 76.

Diagrama del circuito de Arduino



Nota. Representación de la conexión de los componentes y la placa Arduino Uno. Elaboración propia, realizado con Fritzing.

5.2.4. Descripción del código de programación de la Arduino Uno

Se utilizó el Lenguaje de programación C++ que es el más utilizado para el desarrollo de proyectos Arduino. Para su elaboración se necesitó incluir la configuración de un módulo RTC, el sensor de humedad y temperatura DHT11, la pantalla LCD I2C y un relé para el control de la bomba de agua. Para ello, fue necesario incluir librerías, para que el desarrollo del programa fuera más eficiente, rápida y sencilla.

Las librerías utilizadas son:

- Wire.h: librería para la comunicación I2C.
- RTClib.h: librería para el módulo RTC DS3231
- LiquidCrystal_I2C: librería para la pantalla LCD I2C
- DHT.h: librería para el sensor DHT11

El funcionamiento del código de programación se divide en tres procesos, los cuales se describen a continuación:

- Inicialización de librerías y pines: se importan las librerías necesarias y se definen los pines Arduino a utilizar para el sensor DHT11 y para el relé.
- Configuración del *hardware* en *setup()*: se inicializan la comunicación serial, el módulo RTC, la pantalla LCD, el sensor DHT11 y se configura el pin de relé como salida.
- Operación del bucle principal *loop()*:
 - Se lee la hora actual del RTC y se muestra en la pantalla LCD.
 - Se leen valores de humedad y temperatura del sensor DHT11 y se muestran en el LCD.
 - Se define una lógica básica para controlar la bomba de agua con base a la hora actual. En este caso la bomba se activa a las 8:00 AM y se desactiva a las 8:05 AM.
 - Se espera un (1) segundo antes de la siguiente lectura y actualización del sistema.

5.2.5. Código de programación

```
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <DHT.h>

// Definición de pines y constantes
#define DHTPIN 2      // Pin al que está conectado el sensor DHT11
#define DHTTYPE DHT11 // Tipo de sensor DHT11
#define RELAYPIN 3    // Pin al que está conectado el relé

// Inicialización de objetos
RTC_DS3231 rtc;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
    // Inicialización de la comunicación serie
    Serial.begin(9600);

    // Inicialización del RTC
    if (!rtc.begin()) {
        Serial.println("No se pudo encontrar el RTC");
        while (1);
    }
    if (rtc.lostPower()) {
        Serial.println("El RTC perdió energía, ajustando la hora... ");
        rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
    }
}
```

```

}

// Inicialización del LCD
lcd.begin();
lcd.backlight();

// Inicialización del sensor DHT
dht.begin();

// Configuración del pin del relé como salida
pinMode(RELAYPIN, OUTPUT);
digitalWrite(RELAYPIN, LOW);

}

void loop() {
// Lectura de la hora actual del RTC
DateTime now = rtc.now();

// Mostrar la hora en el LCD
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(now.hour(), DEC);
lcd.print(':');
lcd.print(now.minute(), DEC);
lcd.print(':');
lcd.print(now.second(), DEC);

// Lectura del sensor DHT
float h = dht.readHumidity();
float t = dht.readTemperature();

```

```

// Mostrar los datos del sensor en el LCD
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("H:");
lcd.print(h);
lcd.print(" T:");
lcd.print(t);

// Lógica de control de la bomba de agua
// Suponiendo que se desea activar la bomba a las 8:00 AM y apagarla a las
8:05 AM
if (now.hour() == 8 && now.minute() >= 0 && now.minute() < 5) {
  digitalWrite(RELAYPIN, HIGH); // Activar la bomba
} else {
  digitalWrite(RELAYPIN, LOW); // Desactivar la bomba
}
delay(1000); // Esperar 1 segundo antes de la siguiente lectura
}

```

5.3. Diseño propuesto de un sistema de monitoreo de variables climatológicas para el invernadero del CEDA en el entorno Raspberry Pi

El siguiente diseño se desarrolla para un sistema automatizado para el monitoreo de variables climatológicas basado en una placa Raspberry Pi, destinado a optimizar el cultivo hidropónico de lechugas en el invernadero del CEDA de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Este sistema tiene como objetivo monitorear y controlar las variables ambientales críticas como la humedad, la temperatura y la radiación solar para asegurar un entorno de cultivo óptimo.

5.3.1. Esquema de funcionamiento

En el diseño del sistema automatizado de muestreo de variables climatológicas se está utilizando una Raspberry Pi 3 para integrar diversos sensores y medir y controlar las variables mencionadas; mejorando así, la eficiencia y productividad del cultivo hidropónico de lechugas Simpson.

Los componentes a utilizar son los siguientes:

- Raspberry Pi 3: actuará como el cerebro del sistema, coordinando la recopilación de datos y el control de los actuadores.
- Sensores: se conectarán a la Raspberry Pi 3 para medir variables ambientales clave:
 - Humedad: sensor de humedad del ambiente.
 - Temperatura: sensor de temperatura ambiental.
 - Radiación solar: sensor de luz para medir la intensidad de la radiación solar.
- Actuadores: dispositivos que ejecutarán las acciones necesarias para ajustar las condiciones del invernadero.
- *Software de control*: programas y algoritmos desarrollados para procesar los datos de los sensores y tomar decisiones en tiempo real.

5.3.2. Diagrama de flujo

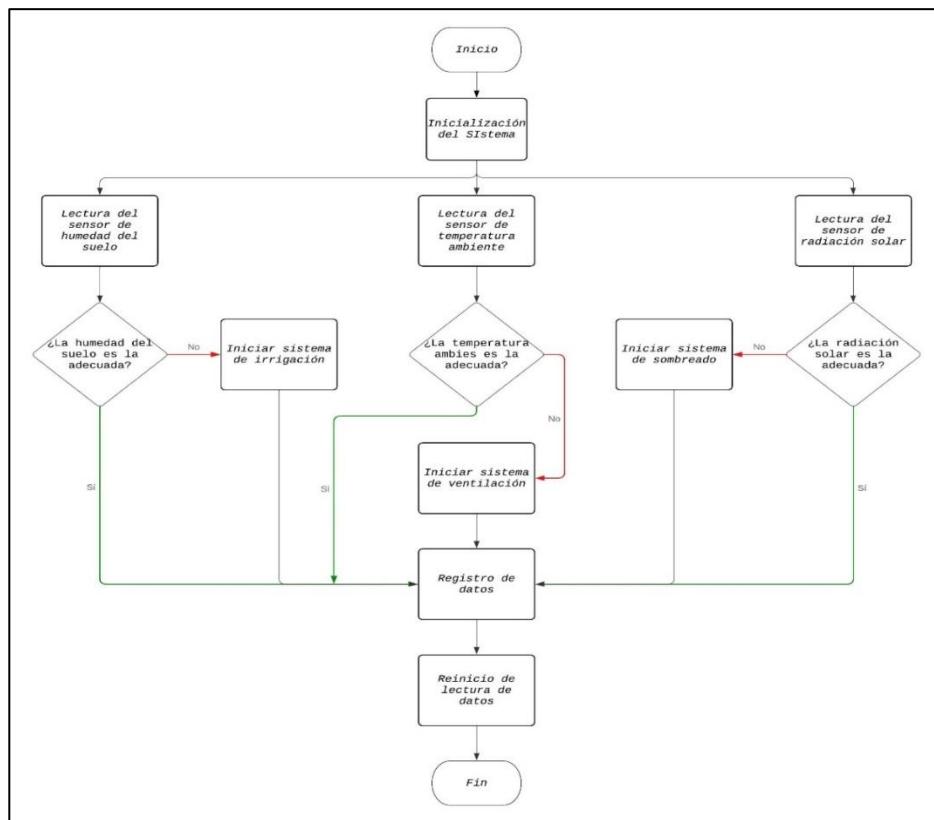
Descripción del diagrama de flujo:

- Inicio
- Inicialización del sistema
 - Configuración de Raspberry Pi
 - Configuración de sensor de humedad de suelo
 - Configuración de sensor de temperatura
 - Configuración de sensor de radiación solar
- Lecturas de sensores
 - Sensor de humedad de suelo
 - Sensor de temperatura ambiental
 - Sensor de radiación solar
- ¿Las condiciones climatológicas son adecuadas?
 - Sensor de humedad de suelo
 - No: iniciar sistema de irrigación
 - Sí: pasar al siguiente paso
- Sensor de temperatura
 - No: ajustar ventilación
 - Sí: pasar al siguiente paso

- Sensor de radiación solar
 - No: ajustar sombreado
 - Sí: pasar al siguiente paso
- Registro de datos de los sensores
- Reiniciar el proceso de lectura y registro de datos
- Fin.

Figura 77.

Diagrama de flujo del sistema de monitoreo de las condiciones climatológicas



Nota. Representación de la lectura y registro de datos del sistema de monitoreo de condiciones climatológicas. Elaboración propia, realizado con Lucid.

5.3.3. Diagrama de conexiones

Para realizar el diagrama de conexiones del diseño del sistema automatizado de monitoreo de condiciones climatológicas, se realizaron las siguientes conexiones

Tabla 24.

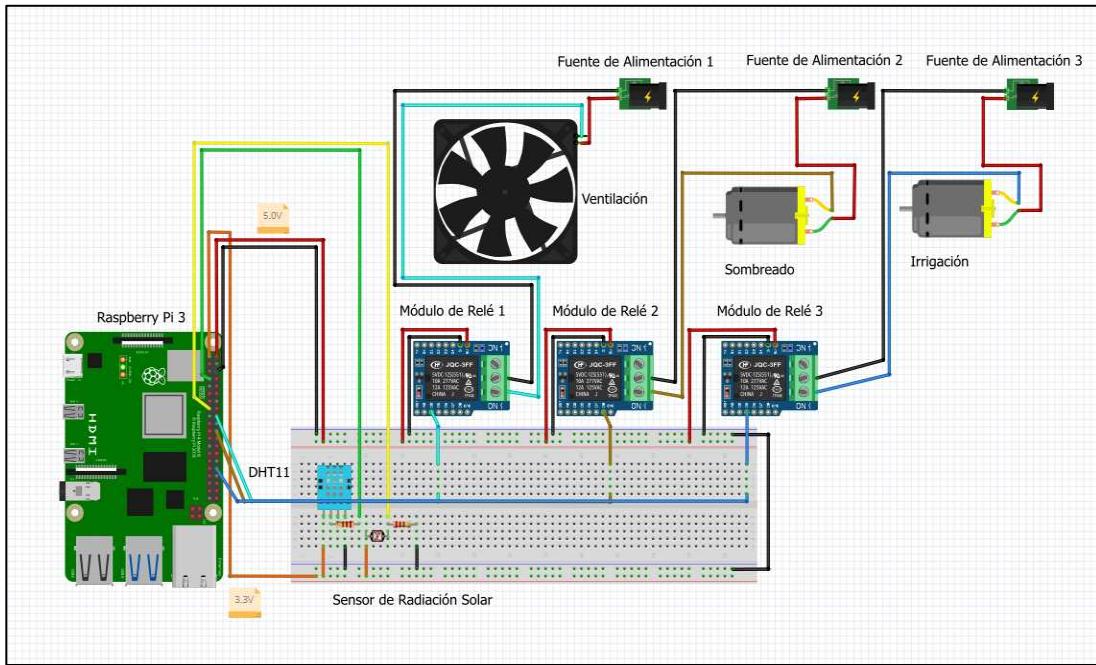
Conexiones para el sistema de monitoreo de condiciones climatológicas en Raspberry Pi

TABLA DE CONEXIONES			
Sensor de humedad de suelo	VCC GND DATA	Pin 1 (3.3V) Pin 6 (GND) Pin 7 (GPIO 4)	Pines Raspberry Pi 3
Sensor DHT11	VCC GND DATA	Pin 1 (3.3V) Pin 9 (GND) Pin 11 (GPIO17)	Pines Raspberry Pi 3
Sensor de radiación solar	VCC GND DATA	Pin 1 (3.3V) Pin 14 (GND) Pin 15 (GPIO 22)	Pines Raspberry Pi 3
Relé sistema de irrigación	VCC GND CONTROL	Pin 4 (5V) Pin 20 (GND) Pin 32 (GPIO 12)	Pines Raspberry Pi 3
	Común (COM) Normalmente abierto (NO)	GND GND	Fuente externa Irrigación
Ventilación	VCC GND	VCC Normalmente abierto (NO)	Fuente externa Relé
Relé sistema de ventilación	VCC GND CONTROL	Pin 4 (5V) GND GPIO 24	Pines Raspberry Pi 3
	Común (COM) Normalmente abierto (NO)	GND GND	Fuente externa Ventilador
Ventilación	VCC GND	VCC Normalmente abierto (NO)	Fuente externa Relé
Relé sistema de sombreado	VCC GND CONTROL	Pin 4 (5V) GND GPIO 25	Pines Raspberry Pi 3
	Común (COM) Normalmente abierto (NO)	GND GND	Fuente externa Sombreado
Sombreado	VCC GND	VCC Normalmente abierto (NO)	Fuente externa Relé

Nota. Conexiones físicas de los componentes a utilizar con Raspberry Pi 3 y una fuentes de alimentación externa. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 78.

Diagrama del circuito de Raspberry Pi 3



Nota. Representación de la conexión de los componentes y la placa Raspberry Pi 3.
Elaboración propia, realizado con Fritzing.

5.3.4. Descripción del código de programación de la Raspberry Pi 3

Se utilizó el lenguaje de programación Python para la Raspberry Pi que monitorea las variables de humedad del invernadero, temperatura y radiación solar. Para la configuración del sensor de humedad del invernadero y el sensor de radiación solar, se utilizaron las entradas analógicas a través de un convertidor ADC como el MCP3008, para la cual se necesitó incluir la librería spidev.

El funcionamiento del código de programación se divide en cuatro procesos, los cuales se describen a continuación:

- Importación de librerías
 - Adafruit_DHT: para el sensor de temperatura y humedad
 - Spidev: para la comunicación SPI con el ADC MCP3008
 - RPi.GPIO: para manejar los pines GPIO de la Raspberry Pi
 - Time: para manejar los retardos
- Configuración de Pines GPIO
 - DHT_PIN: Pin GPIO para el sensor DHT11
 - HUMIDITY_PIN: Pin GPIO para el sensor de humedad del suelo (a través del MCP3008)
- Funciones de lectura
 - Read_channel(channel): lee el valor del canal especificado del MCP3008
 - Convert_volts(data, places): convierte el valor ADC a voltios
 - Read_humidity_sensor(): lee la humedad del aire desde el sensor DHT11
 - Read_temperature_sensor(): lee la temperatura desde el sensor DHT11
 - Read_soil_moisture(): lee el nivel de humedad del suelo
 - Read_light_level(): lee el nivel de radiación solar
- Bucle principal

- Lee continuamente los valores de los sensores y los imprime en la consola
- El bucle se ejecuta hasta que se interrumpe manualmente (Ctrl + C)

5.3.5. Código de programación

```

import Adafruit_DHT
import spidev
import RPi.GPIO as GPIO
import time

# Configuración de los pines GPIO
DHT_SENSOR = Adafruit_DHT.DHT22
DHT_PIN = 17

HUMIDITY_PIN = 4 # A definir según su configuración

# Configuración del SPI para el MCP3008 (para sensores analógicos)
spi = spidev.SpiDev()
spi.open(0, 0)
spi.max_speed_hz = 1350000

def read_channel(channel):
    adc = spi.xfer2([1, (8 + channel) << 4, 0])
    data = ((adc[1] & 3) << 8) + adc[2]
    return data

def convert_volts(data, places):
    volts = (data * 3.3) / 1023

```

```

volts = round(volts, places)
return volts

def read_humidity_sensor():
    humidity, _ = Adafruit_DHT.read_retry(DHT_SENSOR, DHT_PIN)
    return humidity

def read_temperature_sensor():
    _, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(DHT_SENSOR, DHT_PIN)
    return temperature

def read_soil_moisture():
    moisture_level = read_channel(HUMIDITY_PIN)
    return moisture_level

def read_light_level():
    light_level = read_channel(0) # Asumiendo que el LDR está en el canal 0 del
    MCP3008
    return light_level

def main():
    try:
        while True:
            humidity = read_humidity_sensor()
            temperature = read_temperature_sensor()
            soil_moisture = read_soil_moisture()
            light_level = read_light_level()

            print(f"Humedad del Suelo: {soil_moisture}")

```

```
print(f"Temperatura: {temperature} °C")
print(f"Humedad del Aire: {humidity} %")
print(f"Nivel de Luz: {light_level}")
time.sleep(2)
except KeyboardInterrupt:
    print("Detenido por el usuario")
finally:
    spi.close()
    GPIO.cleanup()

if __name__ == '__main__':
    main()
```

6. MANUAL DE INSTALACIÓN

El manual de instalación tiene como finalidad guiar el montaje del sistema embebido Raspberry Pi y Arduino de cultivo hidropónico de lechugas en el Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía propuesto. Este diseño incluye los siguientes sistemas:

- Control de bombeo de agua en Arduino
- Monitoreo de variables climatológicas en Raspberry Pi

6.1. Materiales y herramientas

Se detalla el listado de materiales y herramientas que se necesitan para la instalación de los sistemas en mención.

- *Hardware*
 - Raspberry Pi Model 3B
 - Arduino UNO
 - Computadora
 - Tubería PVC de 1/2" y 2" Clase 100 PSI
 - Microtubos de 6 mm
 - Madera tratada de 3" de largo x 2" de ancho
 - Bomba de agua centrífuga
 - Filtro de agua
 - Módulo RTC

- Pantalla LCD I2C
- Fuente de alimentación 12V
- Módulo de relé 2CH
- Sensores
 - Temperatura y humedad: DHT11
 - Radiación solar: LDR
- *Software*
 - Arduino IDE
 - Python
 - Librerías para componentes y sensores
- Herramientas
 - Destornillador
 - Martillo
 - Barreno
 - Pinzas
 - Alicate
 - Clavos.

6.2. Preparación del sitio de instalación

- Evaluación del lugar: identificar la mejor ubicación para la instalación donde se instalarán la Raspberry Pi y Arduino, este debe de ser un lugar donde la humedad y los cambios de temperatura no afecten el funcionamiento de los mismos.

- Montaje de los módulos hidropónicos: se montan los módulos de acuerdo a los planos de referencia con los materiales indicados.
- Instalación de sensores
 - Temperatura y humedad: ubicarlo en un punto central en invernadero.
 - Radiación solar: colocarlo en el lugar donde capture adecuadamente la iluminación dentro del invernadero.

6.3. Instalación de *hardware*

- Configuración Raspberry Pi
 - Paso 1: fijar la Raspberry Pi en un lugar dentro del invernadero conectándola a la fuente de alimentación.
 - Paso 2: conectar sensores:
 - Sensor de temperatura y humedad: conectar el sensor DHT11 a la Raspberry Pi utilizando los pines GPIO de acuerdo al diagrama de conexión.
 - Sensor de luz (LDR): conectar el LDR a la Raspberry Pi a través de un adaptador analógico-digital.
 - Paso 3: configurar el sistema de almacenamiento de datos.
- Configuración Arduino
 - Paso 1: fijar el Arduino en un lugar dentro del invernadero.

- Paso 2: conectar las salidas digitales del Arduino a los módulos de relé.
- Paso 3: instalar la bomba de agua con el filtro de sedimentos y conectarla a la tubería y a los relés para el control automatizado.
- Paso 4: alimentar la bomba y el Arduino a una fuente de alimentación para garantizar su funcionamiento.

6.4. Configuración de *software*

- Configuración Raspberry Pi
 - Paso 1: instalar y configurar el sistema operativo Raspberry Pi OS.
 - Paso 2: instalar las librerías en Python para el monitoreo de sensores.
 - Paso 3: copiar el código Python propuesto para el registro y almacenamiento de lecturas de temperatura, humedad y luz en la base de datos.
- Configuración Arduino
 - Paso 1: instalar y abrir el entorno de desarrollo Arduino IDE
 - Paso 2: instalar librerías para el control de relés, módulo RTC y pantalla LCD.
 - Paso 3: copiar el programa Arduino propuesto para activar y desactivar las bombas de agua en los intervalos programados.

6.5. Pruebas de funcionamiento

- Pruebas Raspberry Pi

- Prueba de sensores climatológicos: verificar la precisión de las lecturas de temperatura y luz.
- Prueba de almacenamiento de datos: comprobar que las lecturas se almacenen de forma correcta en la base de datos.
- Pruebas Arduino
 - Pruebas de bomba de agua y módulo RTC y de relé: activar y desactivar la bomba a través de Arduino, verificando los tiempos previamente establecidos.
 - Prueba del módulo de pantalla LCD: verificar que en la pantalla se visualicen correctamente los datos de la hora de programación de riego.

7. MANUAL DE USUARIO

Este manual de usuario se creó con el fin de ofrecer una guía sobre el funcionamiento de los sistemas de automatización embebidos en Arduino Uno y Raspberry Pi 3 Model B para el cultivo hidropónico, los cuales consisten en un sistema de bombeo automático y un sistema de monitoreo de las condiciones climatológicas dentro del invernadero del Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía.

7.1. Sistema automatizado de bombeo de agua

El manual para el sistema automatizado de bombeo de agua proporciona las directrices necesarias para operar el mismo. Este sistema utiliza un Arduino Uno, módulo RTC, pantalla LCD I2C, sensor de temperatura y humedad DHT11, módulos de relé y una bomba centrífuga con su filtro de sedimentos.

7.1.1. Funcionamiento del sistema

El sistema permite el control de forma automática de la bomba de agua en función de un horario programado y de las condiciones de humedad y temperatura. En la pantalla LCD se muestran los datos de temperatura y humedad medidos por el sensor DHT 11 y si la bomba está encendida o apagada.

7.1.2. Instrucciones de operación

- Paso 1: encendido del sistema

- Conectar el Arduino Uno a una fuente de alimentación: utilizar un cable USB o un adaptador de corriente.
- Verificar las conexiones: asegurarse que los cables de la pantalla LCD, módulo RTC, sensor DHT11, módulo de relé y bomba de agua estén conectados correctamente.
- Paso 2: visualización de datos en la pantalla LCD
 - Monitorear los valores de temperatura y humedad: verificar que la pantalla LCD muestre los valores medidos de temperatura y humedad.
 - Estado de la bomba: según el horario programado, verificar que en la pantalla LCD muestre el estado de la bomba.
- Control de la bomba de agua
 - Función automática de la bomba: el Arduino enciende la bomba de forma automática según el horario programado en el módulo RTC y esta se apaga luego de cumplir el tiempo de riego establecido.
 - Condiciones ambientales: además de verificar el horario programado en el módulo RTC, se realizan mediciones de temperatura y humedad para que la bomba se active de acuerdo a estos parámetros.
- Ajuste del horario de riego
 - Conexión al IDE de Arduino: conectar el Arduino a una computadora y abrir el IDE de Arduino para ajustar el horario de riego.

- Programación del Módulo RTC: modificar los parámetros de tiempo para ajustar el horario de encendido y apagado de la bomba.
- Paso 5: apagado del sistema
 - Apagar la fuente de alimentación: desconectar el Arduino de la fuente de alimentación cuando el sistema no esté en uso para garantizar la seguridad del sistema
 - Desconectar los módulos: se recomienda desconectar los módulos de la bomba y el sensor de temperatura y humedad para brindar mantenimiento al sistema.

7.2. Sistema de monitoreo de variables climatológicas

El manual proporciona las instrucciones necesarias para la operación del sistema de monitoreo de variables climatológicas en entorno Raspberry PI 3, el cual monitorea humedad del ambiente, temperatura y radiación solar dentro del invernadero. El sistema permite recopilar datos en tiempo real y activar actuadores para regular las condiciones ambientales según los parámetros definidos.

7.2.1. Funcionamiento del sistema

El sistema permite medir y controlar las variables climáticas clave para el cultivo de lechugas, activándose automáticamente cuando las condiciones ambientales exceden los valores preestablecidos.

7.2.2. Instrucciones de operación

- Paso 1: encendido del sistema
 - Conectar la Raspberry Pi a la fuente de alimentación: asegurarse que esté conectado a una fuente estable.
 - Iniciar el sistema de monitoreo: el *software* se iniciará automáticamente en la Raspberry Pi.
- Paso 2: configuración de parámetros ambientales
 - Establecer límites de temperatura, humedad y radiación solar: se seleccionan los valores deseados para cada variable.
 - Guardar la configuración: luego de establecer los valores, guardar la configuración para que el sistema active los actuadores de forma automática cuando los valores excedan o desciendan los valores seteados.
- Paso 3: apagado del sistema
 - Cerrar el *software* de monitoreo: en caso de querer apagar el sistema, cerrar el *software* de monitoreo en la Raspberry Pi
 - Apagar la Raspberry Pi de forma segura: ejecutar el comando de apagado de la Raspberry Pi para evitar daños al sistema.

8. MANUAL DE MANTENIMIENTO

En este capítulo se desarrollan una serie de instrucciones sobre cómo realizar un mantenimiento apropiado para que los sistemas automatizados propuestos funcionen de manera óptima y tengan un mayor tiempo de vida. Se consideran instrucciones para cualquier persona, con o sin experiencia referente al manejo y mantenimiento de microcontroladores y circuitos eléctricos y electrónicos.

8.1. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento es el enfocado en la conservación y el cuidado de los sistemas y equipo a utilizar, al realizarse de forma periódica y programada, garantizan maximizar la vida útil de los equipos, mejorando su rendimiento y reduciendo el tiempo de inactividad no planificada. Como parte de este mantenimiento se consideran la inspección visual, la limpieza y la verificación de las conexiones.

El usuario debe inspeccionar visualmente el estado general de las placas Arduino Uno y Raspberry Pi 3 Model B para buscar daños como algún componente suelto, algún cable dañado que pueda reemplazarse, que las conexiones estén bien aseguradas, que la alimentación y los voltajes sean adecuados o que se encuentren sucios por el ambiente en el que se encuentran.

Para la limpieza de los componentes se recomienda la utilización de aire comprimido o paños de microfibra, es importante evitar la acumulación de polvo y algún otro tipo de residuos. No es recomendable utilizar productos químicos ya que estos dañan los componentes.

8.2. Pruebas de funcionamiento

Para realizar pruebas de funcionamiento, los sistemas deben estar encendidos, con ello se pueden iniciar las pruebas a los sensores de temperatura y humedad y radiación solar, esto también conlleva la verificación de la recepción de señales de la Arduino Uno y de la Raspberry Pi 3 Model B.

Asimismo, es necesario verificar los tiempos del sistema de bombeo, que sean los adecuados ya que de estos depende el suministro de la solución nutritiva a las lechugas.

8.3. Solución de problemas

En caso de encontrar algún problema en la inspección visual o pruebas de funcionamiento, siempre desconectar de la alimentación a los sistemas de automatización para brindarles el mantenimiento adecuado. En caso de ser un caso muy particular, contactar con servicio técnico para evitar accidentes o daños a los sistemas o microcontroladores.

CONCLUSIONES

1. Realizar el diseño de un sistema embebido basado en Raspberry Pi y Arduino para un cultivo hidropónico permitió demostrar cómo la implementación de tecnologías embebidas puede optimizar el manejo de recursos en los cultivos hidropónicos, reduciendo la necesidad de supervisión en el Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía.
2. Al identificar el tipo de sistema hidropónico y sus parámetros técnicos, se logró determinar la infraestructura adecuada para maximizar las condiciones de cultivo. Además, la selección de componentes electrónicos como los sensores de humedad, temperatura y radiación solar, permitió el diseño de un sistema de automatización que responde a las necesidades específicas de este tipo de cultivo.
3. La elaboración de un diseño de conexión y configuración en los entornos Arduino y Raspberry Pi ha demostrado ser una solución flexible y adaptable, capaz de gestionar de manera precisa el monitoreo y control del sistema hidropónico. La Raspberry Pi se utilizó eficazmente para monitorear variables climatológicas y de iluminación, mientras que el Arduino controló de manera efectiva las bombas de riego y otros dispositivos de control, logrando una automatización integral y funcional del sistema.
4. Los manuales de instalación, operación y mantenimiento elaborados en el marco de este proyecto proporcionan una guía práctica y detallada

para futuras instalaciones y para los usuarios del sistema en el CEDA. Estos manuales facilitan la comprensión y manipulación del sistema por parte de estudiantes e investigadores, promoviendo un aprendizaje más profundo y el uso continuado de tecnologías embebidas en el campo de la agronomía.

5. El diseño y parametrización del sistema de automatización está elaborado para utilizarse dentro de un área controlada como lo es un invernadero, por lo que, si se desea llevar al exterior se tienen que tomar en cuenta los requerimientos de radiación solar, humedad relativa y temperatura ambiente de la intemperie.

RECOMENDACIONES

1. Al Centro Experimental Docente de la Facultad de Agronomía, que se hagan las reparaciones necesarias para poder mantener las condiciones ambientales necesarias para garantizar la máxima eficiencia del sistema.
2. Implementar señalización respecto a los protocolos de bioseguridad al momento de querer ingresar al invernadero dado que, los cultivos pueden contaminarse o infectarse de algún virus o plaga al no hacerlo.
3. Implementar el sistema de automatización del cultivo hidropónico, así como el sistema de monitoreo de variables climatológicas propuesto, ya que sería una excelente herramienta didáctica para los estudiantes de la Facultad de Agronomía.

REFERENCIAS

Agrawdata. (2024). *Características y Manejo de los Suelos Francos en la Agricultura Sostenible*. <https://agrawdata.com/blog/suelos-francos/>

Agronotips. (2020). *Como construir un sistema de hidroponía NFT casero*. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2020/12/02/como-construir-un-sistema-de-hidroponia-nft-casero/>

Allegro Central Vacuum Systesms. (2024). *Tubería PVC 2" clase 100 PSI*. <https://www.allegrovacuums.com/es/white-aerus-2-inch-central-vacuum-pvc-pipe-box-of-80-foot.html>

Aquasistemas. (2024). Bomba para agua centrífuga 1/2 HP. <https://aquasistemas.com.gt/tienda/bombas-para-agua/bomba-centrifuga/bomba-para-agua-centrifuga-little-giant-1-2-hp-lcp-05/>

Aqupla. (2024). *Filtro 120 mesh*. <https://aqupla.com/products/106705>

Arias, O. y Cucunubo, P. (2020). *Diseño del sistema NFT para la Unidad Productiva de Lechuga Hidropónica de la Asociación El Trébol en Madrid Cundinamarca*. [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Colombia]. Archivo digital. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25090>

Beltraneno, J. y Gimenez, D. (2015). *Cultivo en Hidroponía*. Editorial de la Universidad de La Plata.

Certis Belchim. (2021). *Mosca Blanca: qué es y cómo se combate.* <https://certisbelchim.es/mosca-blanca-que-es-y-como-se-combate/>

De la Huerta Casa. (2022). *Lechuga Iceberg.* <https://delahuertacasa.com/>

Emociones Verdes. (2022) *Lechuga Simpson.* <https://emocionesverdes.com.co/producto/semilla-lechuga-black-seeded-simpson/>

Equipo editorial INTAGRI. (2019). *Manejo en la Pudrición en el Cultivo de Lechuga.* Intagri. <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/manejo-en-la-pudricion-blanca-en-el-cultivo-de-lechuga#:~:text=Es%20una%20enfermedad%20cuya%20incidencia,estas%20impidiendo%20su%20emergencia.>

Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. (2016). *Manual Organizacional Facultad de Agronomía.* <http://fausac.gt/>

Forsta Filters. (febrero del 2020). *Filtro para Riego de Viveros e Invernaderos.* <https://es.forstafilters.com/filtros-para-riego-de-viveros-e-invernaderos/>

Gustavo Ferrada. (2022). *Lechuga Lollo.* <https://www.gustavoferrada.es/producto/lechuga-lollo-verde/>

Libertyprim. (2022) *Lechuga Romana.* <https://www.libertyprim.com/es/>

Medina, F. (2015). Necesidades nutricionales y de riego de la lechuga. *Revista Agropecuaria* (22), 104-111.

<https://revistas.grancanaria.com/index.php/GRANJA/article/view/9945/9461>

Mymsa. (2024). Maderas y Machihembres. <https://hagaloconmadera.com/>

National Pesticide Information Center. (2024). *Áfidos*.
<http://npic.orst.edu/pest/aphid.es.html>

Palma, C. y Rodríguez, O. (2018). Tarjetas de Desarrollo: Herramientas para el diseño. *Letras ConCiencia y TecnoLógica*, (11), 43-52.
<https://doi.org/10.55411/26652544.104>

Reyes, C. (2015). *Minador de la hoja - Liriomyza sp.* Panorama Agro.
<https://panorama-agro.com/?p=1534>

Ross, N. (2016). *Hidroponía: La guía completa de hidroponía para principiantes.* Babelcube Books.

Sampiero, G. (1997). *Hidroponía Básica: el cultivo fácil y rentable de plantas sin tierra.* Editorial Diana.

Seipasa. (2021) *Mildiu en lechuga: en busca de aliados para su control.*
<https://www.seipasa.com/es/blog/mildiu-en-lechuga-en-busca-de-aliados-para-su-control/>

Sensorgo. (2019). *Estaciones Meteorológicas. ¿Qué son y cómo funcionan?*
<https://sensorgo.mx/estaciones-meteorologicas/>

Sepúlveda, P. (2005). *Fitosanidad en hortalizas para la zona sur.* Inia La Platina

Sepúlveda, R. (2022). *Pudrición gris en lechuga.* Agronotips.

<https://www.portalfruticola.com/noticias/2022/07/19/pudricion-gris-en-lechuga/>

Syngenta. (2022). *Cómo afectan los daños de plagas en el cultivo de lechuga.*

<https://www.syngenta.es/blog/como-afectan-los-danos-de-plagas-en-el-cultivo-de-lechuga>

Universidad Nacional Agraria La Molina. (s.f.). *Módulo de Hidroponía.*

<http://www.lamolina.edu.pe/hidroponia/sistemaNFT.htm>

Valencia, A. (2024). *Guía: Opciones y Diseños para construir un Sistema NFT.*

Hydro Environment.

https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=300

Vegsandflowers. (2022). *Lechuga Canasta.*

<https://vegsandflowers.es/p/1572/lechuga-canasta-f1>

Viagua. (2024). *Microtubo de 6 mm para riego localizado.*

<https://viagua.es/material-riego/microtubo-6-mm/>

Zárate, M. (2014). *Manual de Hidroponía.* Instituto de Biología de México.

Zúñiga, M. (2013). *Evaluación de 18 variedades de lechuga del segmento Salanova, Diagnósticos y Servicios, de la casa comercial, Rijk Zwaan Seeds Export B.V. (Holanda), Chimaltenango, Guatemala, C.A.* [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital.

<http://fausac.usac.edu.gt/tesario/tesis/T-03130.pdf>