

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica

IE0499 – Proyecto Eléctrico

**Automatización del sistema hidropónico para producción
de cultivos en interiores, propiedad del FabLab del IICA**

por

Ricardo Arias Castro

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Agosto de 2021

Automatización del sistema hidropónico para producción de cultivos en interiores, propiedad del FabLab del IICA

por

Ricardo Arias Castro

B60633

IE0499 – Proyecto Eléctrico

Aprobado por

Ing. José David Rojas Fernández, Ph.D.

Profesor guía

Ing. Luis Jorge Poveda Wong, Ph.D.

Profesor lector

Ing. Helber Meneses Navarro, Lic.

Profesor lector

Agosto de 2021

Resumen

Automatización del sistema hidropónico para producción de cultivos en interiores, propiedad del FabLab del IICA

por

Ricardo Arias Castro

Universidad de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Eléctrica

Profesor guía: Ing. José David Rojas Fernández, Ph.D.

Agosto de 2021

En la actualidad, producto del cambio climático, el aumento de la población y la presión sobre los recursos, se han diversificado las estrategias de producción de cultivos a nivel mundial. Los sistemas hidropónicos verticales figuran un papel relevante en este cambio, gracias a su capacidad de independencia del medio circundante y versatilidad para instalarse en zonas con clima adverso, suelos áridos e incluso en interiores de edificaciones.

En el presente proyecto, se desarrolla la automatización para el sistema hidropónico vertical para producción en interiores de cultivos de hoja, propiedad del Laboratorio de Fabricación Digital del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. El objetivo primordial es controlar las principales variables fisicoquímicas del agua: pH, conductividad eléctrica, temperatura y volumen total, además de la temporización del riego y la iluminación; con la finalidad de reducir la intervención humana durante el proceso de producción.

Para cumplir con el objetivo, se implementó un algoritmo de control sobre la plataforma Arduino, el cual interpreta las señales de los sensores utilizados y manipula un conjunto de actuadores, los cuales se encargan de dosificar las sustancias modificadoras los parámetros del agua. Durante el desarrollo de las pruebas de funcionamiento del conjunto, se determinó que el sistema tiene la capacidad de leer correctamente las variables, producir las señales de activación para los elementos de control y, controlar de manera adecuada los horarios de riego e iluminación; por lo cual, se concluye que, con ayuda del sistema implementado, se puede lograr el desarrollo autónomo y adecuado de las plantas, minimizando la intervención humana durante el proceso.

Palabras claves: *automatización, hidroponía, Arduino, algoritmo de control.*

Acerca de IE0499 – Proyecto Eléctrico

El Proyecto Eléctrico es un curso semestral bajo la modalidad de trabajo individual supervisado, con el propósito de aplicar estrategias de diseño y análisis a un problema de temática abierta de la ingeniería eléctrica. Es un requisito de graduación para el grado de Bachiller en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica.

Abstract

Automatización del sistema hidropónico para producción de cultivos en interiores, propiedad del FabLab del IICA

Original in Spanish. Translated as: “Automation of the hydroponic system for indoor crops, property of IICA’s Fab Lab”

by

Ricardo Arias Castro

University of Costa Rica

Department of Electrical Engineering

Tutor: Ing. José David Rojas Fernández, Ph.D.

August of 2021

Nowadays, crop production strategies have been diversified worldwide due to climate change, population's growth, and high demand on resources. Vertical hydroponic systems figure out as an important role on this new shift, primarily due to their independence capability on the surrounding environment along with installation versatility in adverse climate areas, arid soils, and even inside buildings.

This project develops a vertical hydroponic system automation for indoor production of leaf crops, property of the Digital Manufacturing Laboratory of the Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture. The main objective in this project is the management of the main physicochemical variables of the water, such as pH, electrical conductivity, temperature, and total volume, as well as the timing of irrigation and lighting, in order to reduce the human intervention during the growth process.

To accomplish this objective a control algorithm was implemented on the Arduino platform for interpreting the signals of the used sensors and manipulating a set of actuators, which are in charge of substances regulation that modifies water parameters. During the operation test development was established that the system is able to read variables properly, produce the activation of signals for the control elements, and effectively control the irrigation and lighting schedules. Therefore, it is concluded that using the implemented system the autonomous and adequate development of the plants could be achieved and the human intervention during the process would be minimized.

Keywords: automation, hydroponic, Arduino, control algorithm.

About IE0499 – Proyecto Eléctrico (“Electrical Project”)

The “Electrical Project” (or “capstone project”) is a course of supervised individual work of one semester, with the purpose of applying design and analysis strategies to a problem in an open topic in electrical engineering. It is a requisite of graduation for the Bachelor of Science in Electrical Engineering, granted by the University of Costa Rica.

Dedicado a mis hermanos.

Agradecimientos

Agradezco a mi madre quien es mi mayor apoyo, a mi familia que me ha acompañado durante este arduo camino, a mis amigos quienes son mi soporte para superar los retos, a mis profesores que con paciencia, esfuerzo y dedicación me transmitieron sus conocimientos para contribuir con mi formación profesional y; al FabLab del IICA por permitirme desarrollar este proyecto.

Índice general

Índice general	xi
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xiii
1 Introducción	1
1.1. Alcances	1
1.2. Justificación	2
1.3. Problema a resolver	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Metodología	3
1.6. Cronograma	3
2 Fundamentos sobre hidroponía	7
2.1. Concepto	7
2.2. Ventajas y desventajas	7
2.3. Soluciones nutritivas	8
2.3.1. Solución nutritiva A	9
2.3.2. Solución nutritiva B	10
2.4. Condiciones fisicoquímicas del agua	10
2.4.1. Nivel de pH	11
2.4.2. Conductividad eléctrica	11
2.4.3. Temperatura	12
2.4.4. Circulación por el sistema	12
2.4.5. Volumen total	13
2.5. Iluminación	13
3 Plataformas digitales y electrónica	15
3.1. Arduino UNO	15

3.1.1. Librerías	15
3.2. Sensores	16
3.2.1. Sensor de pH	16
3.2.2. Sensor de conductividad eléctrica	17
3.2.3. Sensor de temperatura	18
3.2.4. Sensores de nivel	18
3.3. Actuadores	19
3.3.1. Bombas dosificadoras	20
3.3.2. Bomba de circulación	20
3.3.3. Calentador de agua	21
3.3.4. Relés de estado sólido	21
3.4. Componentes adicionales	21
3.4.1. Reloj en tiempo real	22
3.4.2. Pantalla LCD	22
3.4.3. Tarjeta SD	23
4 Sistema de sensado, actuación y algoritmo de control	25
4.1. Sistema de medición	25
4.2. Sistema de actuación	28
4.3. Componentes adicionales	29
4.4. Algoritmo de control	30
5 Experimentación y resultados del diseño	43
5.1. Circuitos de prueba	43
5.2. Cambios en el código	44
5.3. Resultados obtenidos	48
5.3.1. Discusión	48
6 Conclusiones y trabajo a futuro	53
6.1. Conclusiones	53
6.2. Recomendaciones y trabajo a futuro	54
A Hojas de fabricante disponibles de los componentes empleados	55
A.1. Hoja del fabricante del sensor digital de temperatura DS18B20	55
A.2. Hoja del fabricante del interruptor de nivel de líquido, de montaje superficial	57
A.3. Hoja del fabricante de la bomba difusora de diafragma modelo R385	59
A.4. Hoja del fabricante de la bomba sumergible de circulación de agua, modelo AQUA30W	61
A.5. Hoja del fabricante de los relés de estado sólido, serie SSR	63
B Datos recolectados	65
B.1. Datos de las pruebas experimentales	65

Índice de figuras

2.1.	Sistema hidropónico empleado para el proyecto.	8
3.1.	Interruptor flotante de montaje lateral [4].	19
4.1.	Diagrama de bloques general del sistema implementado [Elaboración propia].	26
4.2.	Diagrama eléctrico del sistema de medición [Elaboración propia].	27
4.3.	Ubicación de los sensores en el tanque de almacenamiento del sistema [Elaboración propia].	28
4.4.	Diagrama eléctrico del sistema de actuación [Elaboración propia].	29
4.5.	Diagrama eléctrico de los componentes adicionales [Elaboración propia].	30
5.1.	Diagramas de los circuitos utilizados para emular el comportamiento de los sensores de pH, conductividad eléctrica y nivel [Elaboración propia].	44
5.2.	Circuitos implementados para emular el comportamiento de los sensores de pH, conductividad eléctrica y nivel [Elaboración propia].	45
5.3.	Ejemplos de mediciones realizadas durante las pruebas experimentales.	49
5.4.	Gráfico de pH y activación de la bomba de urea, en función del tiempo.	49
5.5.	Gráfico de conductividad eléctrica (EC) y activación de la bomba de sustancia A, en función del tiempo.	50

Índice de tablas

1.1.	Pasos metodológicos para el desarrollo del proyecto	4
1.2.	Cronograma de actividades del proyecto	5
2.1.	Principales ventajas y desventajas de los sistemas hidropónicos [9].	9

3.1. Características principales del Arduino UNO [1].	16
3.2. Librerías de Arduino útiles para el proyecto.	17
3.3. Características principales de los sensores de pH y conductividad eléctrica [5] [6].	18
3.4. Características principales del sensor de temperatura digital DS18B20.	19
3.5. Características principales del interruptor de nivel de líquido, de montaje superficial.	20
3.6. Características principales de la bomba difusora de diafragma.	20
3.7. Características principales de la bomba sumergible para la circulación del agua.	20
3.8. Características principales del calentador de agua sumergible.	21
3.9. Características principales de los relés de estado sólido.	22
4.1. Comportamiento del circuito para los sensores de nivel.	28
B.1. Datos recolectados durante las pruebas experimentales al sistema, primera parte.	65
B.2. Datos recolectados durante las pruebas experimentales al sistema, segunda parte.	66

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El avance social y tecnológico, ha provocado una mayor necesidad de materias primas y productos básicos para su sostenibilidad. Esta presión sobre los recursos propicia una mayor explotación de los suelos e intensifica problemas ambientales y el cambio climático. Una contribución a la solución de esta problemática son los sistemas de cultivo hidropónico, cuyo uso se ha incrementado progresivamente en los últimos años.

En el presente documento se detalla el desarrollo de la automatización del sistema hidropónico de lámina de agua para cultivo vertical de plantas de hoja en interiores, implementado en el Laboratorio de Fabricación Digital (FabLab) del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). El sistema se compone de 3 niveles que cuentan con iluminación propia y deben ser irrigados por agua proveniente del tanque de almacenamiento central incluido en el conjunto. El sistema tiene una capacidad máxima de 108 plantas individuales por nivel, con una densidad promedio de 54 unidades, según las dimensiones finales del cultivo a producir.

Para el desarrollo oportuno de las plantas, es necesario mantener las principales variables fisicoquímicas del agua del sistema, dentro de un rango definido por medio de la teoría y, modificado en base a los resultados experimentales. Para modificar estos parámetros, se plantea la medición de las variables más relevantes y por medio de esta información, desarrollar un mecanismo control automático para mantener sus valores dentro del rango óptimo. Se espera que, al concluir el proyecto, la intervención humana sobre el desarrollo de los cultivos, se limite al proceso de plantado y cosecha, así como del llenado de los tanques de almacenamiento de materias primas que permiten la operación adecuada de conjunto.

1.1. Alcances

El proyecto se desarrolla en un contexto interdisciplinario donde se involucran diversas carreras y áreas del conocimiento, tales como biología, agricultura, geografía, electrónica, entre otras. Por este motivo, para la ejecución del proyecto, se plantea una implementación del sistema automatizado basada en componentes accesibles al público, de bajo costo y, de fácil uso y reemplazo. Para lograrlo, se propone la utilización de la plataforma de software y hardware abierto Arduino, debido a su bajo costo, dificultad de aprendizaje intermedia y manejo previo de los participantes del laboratorio.

Respecto al control propiamente del sistema, entre las posibles variables fisicoquímicas del agua que pueden ser controladas, el desarrollo del proyecto se limita al control de los 4 aspectos principales: temperatura del agua, nivel de pH, conductividad eléctrica y nivel del tanque de reserva. Además de controlar los parámetros del agua, es necesario garantizar un ciclo adecuado de iluminación, una adecuada irrigación del agua por todos los niveles y, la adición de los nutrientes requeridos por las plantas para su desarrollo. Por esta razón, el sistema también abarcará el control de tiempo de iluminación, así como el flujo de agua desde el tanque de reserva hasta el primer nivel.

El diseño de los niveles cuenta con las ventajas de permitir el flujo adecuado del agua en ellos y conducirla al nivel inferior, en adición a esto, la cantidad de nutrientes disueltos en el agua se relaciona directamente con el nivel de pH y conductividad eléctrica de la misma; por lo cual, no se tomarán consideraciones adicionales en estos aspectos. Finalmente, al no contar con ningún tipo de sustrato de base y, si se mantienen las condiciones ambientales controladas, los sistemas hidropónicos en interiores no presentan problemáticas relacionadas con plagas en los cultivos, por ende, en este proyecto no se tomarán acciones al respecto.

1.2. Justificación

En zonas altamente pobladas, la producción de cultivos se ve limitada por la poca disponibilidad de terrenos que puedan ser destinados para actividades agrícolas y, por la mala calidad de los mismos producto de la intervención humana. De la misma manera, en zonas áridas, la calidad de los suelos, la escasez de agua y las condiciones climáticas adversas, representan una barrera a superar para el desarrollo de plantas para el consumo humano. Por estas razones, el desarrollo de sistemas hidropónicos aislados para la producción autónoma de plantas de hoja en interiores, son de gran relevancia en diversos contextos.

Abarcando desde las aplicaciones típicas, como el cultivo de plantas en el interior del laboratorio para consumo propio, hasta el desarrollo de grandes sistemas de producción en zonas áridas deshabitadas, para abastecer a pequeños pueblos aislados o; por el contrario, zonas altamente pobladas y que no cuentan con terrenos fértiles, los sistemas hidropónicos representan una alternativa al esquema típico de cultivo, ahorrando espacio, tiempo, recursos y, proporcionando ventajas como versatilidad, sostenibilidad y efectividad en la obtención de alimentos.

Los cultivos que se producen actualmente en el sistema, por medio de un control manual de los parámetros, se emplean para consumo interno del personal del IICA. Además, los hallazgos del proyecto serán utilizados para el desarrollo de sistemas análogos a gran escala, cuya implementación en contextos ambientales adversos. Por lo cual, la implementación del proyecto y los hallazgos encontrados durante su desarrollo, son de gran importancia para el beneficio propio del laboratorio, además de contribuir en futuras investigaciones, nacionales e internacionales, en el tema.

1.3. Problema a resolver

En el presente proyecto se pretende implementar un sistema de monitoreo y control para la automatización del sistema hidropónico de cultivo en interiores. Se diseñará un sistema de sensores para la

lectura de las principales variables fisicoquímicas del agua y un conjunto de actuadores que modifican los valores de las diferentes variables, para ubicarlas en los rangos idóneos. Para lograr este cometido, es necesario el desarrollo de algoritmos de control que interpreten las señales de los sensores y produzcan nuevas señales para el control de los actuadores.

Estos algoritmos de control deben ser programados en una plataforma digital, de manera que se pueda interactuar con el hardware de sensado y actuación. En los alcances del proyecto se planteó que el sistema debe mantenerse accesible para individuos de otros campos del conocimiento, por lo cual, parte del problema a resolver abarca la implementación los algoritmos necesarios para la aplicación en cuestión, empleando la plataforma Arduino propuesta, sin comprometer en gran medida su efectividad.

1.4. Objetivos

Para concretar la solución planteada, se establecen los siguientes objetivos:

1.4.1. Objetivo general

Automatizar el sistema hidropónico de lámina de agua, por medio del monitoreo y corrección de sus variables fisicoquímicas, para el cultivo autónomo en interiores, de plantas de hoja.

1.4.2. Objetivos específicos

- Investigar sobre potenciales sensores de utilidad y estudiar su funcionamiento, para determinar los idóneos a utilizar y diseñar la estructura de medición de las variables de interés.
- Diseñar los actuadores para la corrección de las variables controladas del sistema y la estructura para su operación por medio del controlador.
- Desarrollar los algoritmos de control que procesen los diferentes valores medidos y operen los respectivos actuadores, para mantener las variables controladas en sus rangos adecuados.
- Implementar el hardware de los diseños anteriores de sensores, actuadores y algoritmo de control, para mantener estables las variables de interés y evaluar el funcionamiento general del sistema.

1.5. Metodología

Para concretar los objetivos planteados durante el desarrollo del proyecto, se plantean una serie de pasos metodológicos por objetivo, los cuales se muestran en la Tabla 1.1

1.6. Cronograma

Para lograr la ejecución adecuada de los pasos metodológicos durante el periodo semestral, se plantea la distribución temporal de tareas que se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.1: Pasos metodológicos para el desarrollo del proyecto

Objetivos específicos	Pasos metodológicos
Investigar sobre potenciales sensores de utilidad y estudiar su funcionamiento, para determinar los idóneos a utilizar y diseñar la estructura de medición de las variables de interés.	<ul style="list-style-type: none"> Revisión bibliográfica sobre producción de cultivos hidropónicos de hoja y obtención de los parámetros ideales. Revisión y selección de sensores disponibles en el mercado, de bajo costo y complejidad, aplicables a los rangos encontrados. Diseño e implementación la estructura para la medición de las variables fisicoquímicas a controlar.
Diseñar los actuadores para la corrección de las variables controladas del sistema y la estructura para su operación por medio del controlador.	<ul style="list-style-type: none"> Revisión y selección de dispositivos (bombas, termostatos, etc) para la implementación de los actuadores. Diseño e implementación los actuadores y su mecanismo de operación.
Desarrollar los algoritmos de control que procesen los diferentes valores medidos y operen los respectivos actuadores, para mantener las variables controladas en sus rangos adecuados.	<ul style="list-style-type: none"> Investigación sobre la plataforma Arduino y la implementación de algoritmos de control en esta. Recolección y análisis los datos de los sensores y de la operación de los actuadores. Implementación de los algoritmos de control y ajuste inicial en base a los datos recolectados.
Implementar el hardware de los diseños anteriores de sensores, actuadores y algoritmo de control, para mantener estables las variables de interés y evaluar el funcionamiento general del sistema.	<ul style="list-style-type: none"> Acople de los subsistemas de sensado, actuado y de control, al sistema general. Recolección los datos de las variables controladas y verificación la operación de los actuadores. Reajuste de los algoritmos de control en base a los datos recolectados, en caso de ser necesario. Ánalisis de la operación general del sistema y evaluación su funcionamiento y eficacia.

Tabla 1.2: Cronograma de actividades del proyecto

Periodo	Tareas a realizar
26 al 30 de abril	Entrega del anteproyecto.
3 al 7 de mayo	Revisión bibliográfica sobre producción de cultivos hidropónicos de hoja e investigación sobre Arduino y algoritmos de control.
10 al 14 de mayo	Elaboración del marco teórico (capítulo 2).
17 al 21 de mayo	Revisión y selección de sensores y, dispositivos para los actuadores. Caracterización de los componentes.
24 al 28 de mayo	Diseño e implementación del sistema de medición y actuación.
31 de mayo al 4 de junio	Entrega del avance 1. Recolección de datos sensados y de funcionamiento de los actuadores.
7 al 11 de junio	Diseño e implementación de los algoritmos de control, en la plataforma Arduino. Ajuste inicial de estos.
14 al 18 de junio	Puesta en marcha del sistema completo de control. Recolección de datos sensados y de funcionamiento de los actuadores.
21 al 25 de junio	Entrega del avance 2. Análisis de los datos recolectados.
28 de junio al 2 de julio	Ajuste de los algoritmos de control en base a la operación del conjunto completo.
5 al 9 de julio	Recolección y análisis de datos los nuevos datos recolectados. Comparación con los valores previos al ajuste y, síntesis de conclusiones y recomendaciones.
12 al 16 de julio	Entrega del borrador final.
2 al 6 de agosto	Presentación en línea.
16 al 20 de agosto	Entrega del reporte final.

Las secciones posteriores del documento se organizan de la siguiente manera, Capítulos 2 y 3, en los cuales se proporciona la base teórica y antecedentes del proyecto. Capítulo 4, donde se detalla el diseño de los subsistemas de medición, actuación y control, así como sus características principales. Capítulo 5, en el cual se muestran las pruebas experimentales, los resultados obtenidos y el análisis de estos. Finalmente, Capítulo 7, donde se sintetizan las principales conclusiones del trabajo realizado, así como posibles mejoras y trabajo a futuro.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS SOBRE HIDROPONÍA

2.1. Concepto

El término hidroponía engloba al conjunto de técnicas que permiten la producción de cultivos principalmente herbáceos (de hoja), en estructuras simples o complejas, que no requieren el uso de suelo, tales como azoteas, suelos infértilles, terrenos escabrosos, invernaderos, entre otros [2]. Las técnicas mayormente empleadas en los cultivos hidropónicos, hacen uso de sustratos o soluciones nutritivas tanto estáticas como circulantes, por medio de las cuales, las plantas en crecimiento absorben los nutrientes necesarios para su desarrollo [2].

En adición a lo anterior, la circulación de agua es indispensable para el desarrollo de los cultivos, ya que permite, entre otras funciones, la oxigenación de la misma y la disolución de los nutrientes provenientes del sustrato o las soluciones nutritivas. El agua también propicia el proceso de transpiración vegetal, necesario para la absorción de dióxido de carbono durante la fotosíntesis, además de que conforma entre el 60 % y el 90 % de la masa de la planta [2]; por lo cual, se debe considerar no solo la buena circulación, sino también un volumen total adecuado del líquido en el sistema.

El sistema empleado para el proyecto no utiliza sustrato propiamente, ya que su estructura constructiva proporciona el soporte necesario a las plantas. Al no emplear sustrato, la raíz de la planta se suspende directamente en el agua que fluye sobre la bandeja inferior, en otras palabras, el agua del sistema es el sustrato de la planta [9]. En la figura 2.1 se observa una imagen del sistema hidropónico con el que se trabajará, propiedad del FabLab del IICA.

Dadas las condiciones descritas, la técnica hidropónica más efectiva es la NFT (Nutrient Film Technique, según sus siglas), también conocida como técnica de lámina de nutrientes recirculante. En esta técnica, los nutrientes son disueltos en el agua, la cual circula por las raíces de los cultivos y entra en contacto con el aire durante el proceso, por lo cual se mantiene constantemente oxigenada [2].

2.2. Ventajas y desventajas

Si bien la hidroponía supone un gran aporte para la sociedad actual, con grandes beneficios y oportunidades de progreso, presenta algunas desventajas importantes las cuales se deben considerar cuando se



Figura 2.1: Sistema hidropónico empleado para el proyecto.

incurre en un proyecto de esta índole. En la tabla 2.1 se observa una comparativa entre las principales ventajas y desventajas de los sistemas hidropónicos generalmente empleados.

2.3. Soluciones nutritivas

Como se mencionó en la sección anterior, la nutrición de las plantas en el sistema se da por medio de la disolución de los nutrientes directamente en el agua, por lo cual, resulta fundamental determinar cuáles elementos son los necesarios para el desarrollo adecuado de los cultivos y como preparar las soluciones nutritivas que los contengan. Para el caso específico de este proyecto, se trabajarán únicamente plantas de hoja como lechuga, cebollino, apio, entre otras; por lo cual, las soluciones nutritivas estarán enfocadas al desarrollo de este tipo de cultivos.

Para la preparación de las sustancias nutritivas, no basta únicamente con añadir las proporciones indicadas de cada compuesto, para ello, es necesario ejecutar una serie de pasos ordenados y estrictos, para obtener un resultado adecuado. Por esta razón, se detallan las proporciones y los procedimientos para preparar las soluciones a emplear. Irrespetar la secuencia mostrada puede provocar la precipitación de algunas sales o variaciones en el pH final de la sustancia.

Tabla 2.1: Principales ventajas y desventajas de los sistemas hidropónicos [9].

	<ul style="list-style-type: none"> • Independencia de fenómenos meteorológicos. • Equilibrio entre agua, aire y nutrientes, en las raíces. • Produce varias cosechas al año. • Buen drenaje del agua. • Permite el control de los parámetros fisicoquímicos del agua y del ambiente.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Contribuye con el ahorro del agua. • Permite mayor densidad y calidad de cultivos. • Reduce los costos de producción y de maquinaria. • Reduce la contaminación del ambiente y la erosión del suelo. • Rápida recuperación de la inversión inicial.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Para la producción comercial, es necesario contar con conocimiento sobre las especies de cultivo y química inorgánica. • Requiere una alta inversión inicial. • Es necesario el mantenimiento periódico de las instalaciones, el control de las soluciones nutritivas, los materiales y componentes, entre otros.

2.3.1. Solución nutritiva A

La solución A provee a las plantas de los principales macroelementos necesarios para su desarrollo, tales como el nitrógeno, magnesio, fósforo, azufre, potasio y calcio [2], [9]. Esta es la sustancia principal para la producción en el sistema, por lo cual no se debe incumplir su preparación y uso.

Proporción de compuestos (por cada 10 L de agua) [3]:

- 340 g de fosfato monoamónico (16-20-0).
- 2080 g de calcio.
- 1100 g de nitrato de potasio.

Preparación [3]:

- Mida 5 L de agua y coloque en un recipiente de plástico opaco con cierre hermético.
- Añada una a una y en orden, las masas de compuestos antes detallados. No agregue el siguiente compuesto hasta que la sustancia previa se encuentre completamente disuelta.
- Agregue el volumen de agua restante para completar los 10 L. Agite la mezcla durante mínimo 10 minutos, hasta que la masa de sales restante se disuelva por completo.

2.3.2. Solución nutritiva B

La solución B provee a las plantas de los principales microelementos que complementan su crecimiento, tales como el boro, manganeso, hierro, cobre, zinc y molibdeno [2], [9]. Esta sustancia es complementaria, sin embargo, no se debe prescindir de la misma, si se desea una producción óptima, lo cual conlleva su adecuada preparación y uso.

Proporción de compuestos (por cada 2 L de agua) [3]:

- 220 g de sulfato de magnesio.
- 12 ml de metalosato de hierro (ó 4 gramos de quelato de hierro).
- 12 g de nutrientes menores (Fetrilon Combi 1 ®).
- 1,2 g de ácido bórico (Borosil).

Preparación [3]:

- Mida 1 L de agua y coloque en un recipiente de plástico opaco con cierre hermético.
- Añada una a una y en orden, las sales anteriores. No agregue el siguiente compuesto hasta que la sal previa se encuentre completamente disuelta.
- Agregue el volumen de agua restante para completar los 2 L. Agite la mezcla durante mínimo 10 minutos, hasta que la masa de sales restante se disuelva por completo.

2.4. Condiciones fisicoquímicas del agua

Si bien, ya se conoce que las soluciones nutritivas que se aplicarán al agua aportan los nutrientes indicados, las plantas requieren que el agua presente ciertas condiciones para propiciar la absorción de los mismos. Los parámetros del agua cuyo control resulta fundamental para el adecuado desarrollo de la planta son: el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura, circulación por el sistema y el volumen total de líquido.

2.4.1. Nivel de pH

Mantener un nivel de pH adecuado en el sistema resulta de gran importancia ya que tiene dos efectos cruciales, tanto en las plantas propiamente, como en el agua recirculante del sistema. Primeramente, un nivel indicado de pH produce que las plantas absorban correctamente y en la proporción idónea, los nutrientes del agua [9]. Además, mantener un nivel de pH adecuado evita que las sales disueltas se precipiten, lo cual previene la fitotoxicidad y la carencia de nutrientes [3].

El nivel indicado de pH para propiciar la absorción de los nutrientes necesarios, para el caso específico de las plantas herbáceas (o de hoja), mismas que se producirán en el sistema, ronda entre 6 y 7 [9]. Debido a las proporciones de los compuestos presentes en las soluciones nutritivas a emplear, el pH recomendado para el agua del sistema es de 6 [3], permitiendo ligeras variaciones hacia un pH más neutro, mas no hacia uno más ácido.

El agua típicamente utilizada en el sistema presenta un valor de pH superior al neutral (entre 7.5 y 8). En adición a esto, al incluir las soluciones nutritivas al sistema, el nivel de pH tiende a mantenerse similar al original del agua. Por estos motivos, se debe emplear una tercera sustancia acidificante [3], para la cual se seleccionó la urea, debido a su bajo pH y su aporte secundario de nutrientes al sistema general; sin embargo, pueden ser empleadas otras sustancias como el jugo de limón o el vinagre. En caso de presentarse un comportamiento opuesto, se puede añadir sustancias como bicarbonato de sodio o hidróxido de potasio, para obtener un pH más alcalino [9].

2.4.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del agua es una medida directa del nivel de sales disueltas en ella, por ende, con esta medición se puede determinar el nivel de nutrientes presentes. Al efectuar la dosificación adecuada de las soluciones nutritivas y mantener un nivel óptimo de pH, se provoca que los cultivos absorban de manera uniforme los nutrientes disueltos, por lo cual no es necesario realizar mediciones específicas para determinar la concentración de cada compuesto específico.

En base a las proporciones utilizadas en las soluciones nutritivas, se define que la conductividad eléctrica debe encontrarse en un intervalo entre 1,2 mS y 1,8 mS [3], el cual denota una adecuada concentración de nutrientes. Se sugiere ubicar el valor de conductividad en el medio del intervalo previo, durante la mayor parte del tiempo de crecimiento del cultivo; sin embargo, en la etapa de plantado se debe reducir al mínimo y aumentarlo gradualmente conforme crece la planta [3]. De manera similar, cerca de la época de cosecha, se recomienda aumentar el nivel del conductividad a un valor cercano al máximo [3].

Como se menciona previamente, el nivel de conductividad eléctrica está ligado a los nutrientes disponibles en el agua, por lo cual, para aumentar el nivel de conductividad eléctrica del agua, se debe realizar una dosificación gradual de las soluciones nutritivas antes descritas. Cuando el sistema se pone en funcionamiento por primera vez, se debe añadir un volumen inicial de 2,5 mL de la solución A en conjunto con un volumen de 1 mL de la solución B, por cada litro de agua del sistema [3].

Cuando el sistema ya se encuentra en operación y se necesita aumentar el nivel de nutrientes en el agua (baja conductividad), se debe añadir de manera gradual, las soluciones nutritivas A y B, hasta alcanzar el valor indicado de conductividad. La adición se debe realizar en una proporción de 5 partes

de sustancia A, por cada parte de sustancia B y, los volúmenes recomendados son de 5 mL de sustancia A y 1 mL de sustancia B, por cada litro de agua en el sistema. Se recomienda añadir pequeñas dosis al sistema, permitir la homogeneización y luego realizar la medición para comprobar el nivel [3]; para repetir el proceso hasta alcanzar el valor indicado.

En caso de sobrepasar el nivel máximo de conductividad, se deberá agregar agua neutra para disolver el excedente. En caso de que el sistema se encuentre en su volumen máximo de agua, se deberá realizar un cambio parcial de agua para bajar el nivel de nutrientes y evitar los efectos negativos sobre las plantas.

2.4.3. Temperatura

La temperatura tanto del ambiente, como del agua del sistema, juegan un papel importante en el crecimiento de las plantas. Si la temperatura en ambos medios es muy baja, aletarga el metabolismo de la planta y produce retrasos en su crecimiento y maduración [2], caso contrario ocurre cuando se aumenta la temperatura. No obstante, no se debe abusar del aumento de temperatura, ya que puede provocar desnaturalización y deshidratación en las plantas.

De igual forma, el aumento excesivo de la temperatura puede provocar la evaporación desmedida del agua del reservorio, provocando concentraciones de nutrientes superiores a las indicadas, además de que provoca que el agua pueda retener menos oxígeno, lo cual afecta directamente a las raíces de las plantas [3]. Como se puede inferir, el control de la temperatura del agua es de vital importancia, principalmente si se escala el sistema a localizaciones con climas menos propicios para las plantas tratadas.

El rango de temperatura indicado para el agua del sistema, abarca temperaturas entre 15 y 25 °C, a su vez, la temperatura del ambiente en el cual se implementa el sistema, no debe superar los 30 °C [3]. Dadas las condiciones ambientales del entorno donde se ubica el sistema, la temperatura ambiente no supera los 30 °C (en los días más calurosos), presentando una variación típica de temperatura entre 19 y 23 °C, durante el día. En base a estas condiciones, se fijó una temperatura mínima de 17 °C para el agua recirculante. Respecto a la temperatura ambiental, dada que no supera el límite máximo, no resulta necesario tomar acciones sobre la misma.

2.4.4. Circulación por el sistema

En los sistemas que emplean la técnica NFT, la circulación temporizada y periódica del agua por los niveles es uno de los aspectos primordiales. El paso intermitente del agua por las raíces de los cultivos permite el intercambio gaseoso, la regulación térmica, la absorción adecuada de los nutrientes y, el movimiento del agua permite que esta se mantenga oxigenada [2], [3]. Intervalos extensos de riego con poco tiempo intermedio, provoca aumento en la temperatura en las raíces, dificulta a las plantas el intercambio gaseoso y provoca el sofoco de las mismas. De manera opuesta, intervalos de riego cortos con largos tiempos en medio, provoca deficiencia en la absorción de nutrientes, deshidratación de la planta y eventualmente, su muerte [2].

Para la irrigación del sistema completo, los niveles que lo conforman cuentan con una pendiente entre dos de sus esquinas diametralmente opuestas, las cuales a su vez presentan una entrada de agua

del nivel superior y una salida al nivel inferior. Para llevar el agua hasta el nivel más alto, se puede hacer uso de una bomba de agua, la cual se alimenta del tanque de almacenamiento. El intervalo de circulación recomendado comprende ciclos de 30 minutos de riego con 30 minutos de descanso [3], sin embargo, con base en las pruebas experimentales realizadas hasta el momento, el ciclo que mejores resultados muestra comprende 15 minutos de riego con 15 minutos de descanso; por lo tanto, este último será el utilizado.

2.4.5. Volumen total

Mantener el volumen de agua que circula en el sistema, cercano al nivel óptimo, es de gran importancia tanto para las plantas, como para el adecuado funcionamiento del sistema completo. Las plantas requieren del agua para realizar la mayor parte de sus actividades y procesos diarios, por lo cual se debe contar con un volumen mínimo para suplir estas necesidades. El nivel mínimo del agua también se debe considerar posteriormente para la selección de la bomba de circulación del agua, ya que estas, en ocasiones, requieren estar completamente sumergidas para su correcta operación.

Como se observa anteriormente, el nivel mínimo del agua es de gran importancia, sin embargo, también es necesario considerar un nivel máximo. El motivo principal a considerar, para definir la máxima cantidad de agua, proviene de las características constructivas del sistema hidropónico. Este cuenta con tres niveles para el plantado, en los cuales se mantiene un volumen permanente de 20 L, además de un volumen transitorio de 10 L, para cada caso. El sistema cuenta además con un tanque de almacenamiento de agua, capaz de albergar un volumen máximo aproximado de 110 L.

Producto de la presencia en el tanque, de la entrada del desagüe de los niveles, el volumen máximo efectivo que el tanque puede almacenar es de 77 L de agua. Por lo tanto, cuando el sistema se encuentra activo, considerando los 30 L circulantes por el sistema, se define un volumen máximo en el tanque de 45 L. El volumen mínimo del tanque, cuando el sistema se encuentra en operación, dependerá de las características de la bomba a emplear. Es de importancia no sobrepasar el nivel máximo anterior, para prevenir que el tanque se rebalse durante el periodo de inactividad del sistema y; de manera similar, no se debe emplear menos volumen del mínimo indicado, ya que puede provocar problemas en la irrigación de los niveles superiores.

2.5. Iluminación

Como último punto principal a considerar, para el adecuado desarrollo de las plantas en el sistema hidropónico, se encuentra la iluminación del conjunto. Comúnmente, los sistemas hidropónicos a pequeña escala se suelen situar en espacios abiertos, en los cuales se aprovecha la iluminación natural del exterior, sin embargo, en el caso particular del sistema con el que se trabaja actualmente, se cuenta con iluminación artificial. Esta iluminación consiste en 6 barras por nivel, integradas por diodos LEDs de color blanco, azul y rojo, que cubren el espectro completo de radiación necesario para las plantas y; estas barras se encuentran encapsuladas con una cubierta plástica transparente, hermética al polvo y la humedad.

Gracias a que el conjunto posee su propia iluminación, infraestructura de soporte para la misma y demás accesorios, no es necesario realizar intervenciones adicionales. No obstante, es necesario contro-

lar el ciclo diario de iluminación, ya que las plantas requieren tanto del ciclo diurno en el cual realizan la fotosíntesis y sintetizan energía, como de un ciclo nocturno, en el cual realizan la fase oscura y el proceso de crecimiento [2].

El ciclo natural de iluminación en las plantas se puede aproximar a 12 horas diarias, para el caso de los países cercanos al trópico, con hora de inicio las 6:00 y de finalización, las 18:00. Para el caso del sistema trabajado, el tiempo de iluminación se puede ajustar igual al previo, sin embargo, considerando los resultados experimentales observados durante la producción de las plantas típicas, se obtuvo un resultado óptimo de crecimiento cuando el inicio de la iluminación se inicia a las 8:00 horas y se concluye a las 20:00 horas del día; por lo cual, se optará por este intervalo para el desarrollo posterior.

Capítulo 3

PLATAFORMAS DIGITALES Y ELECTRÓNICA

3.1. Arduino UNO

Entre las diferentes plataformas digitales que permiten el manejo de variables eléctricas de entrada, la implementación de algoritmos de control y el manejo de variables de salida, destaca la plataforma de software y hardware abierto Arduino. Producto de la amplia compatibilidad con sensores y actuadores de variados fabricantes y, la gran gama de librerías disponibles para manipular datos de entrada, esta plataforma resalta sobre sus competidoras, ofreciendo un mecanismo efectivo para la implementación de sistemas de automatización, el cual a su vez presenta una curva de aprendizaje baja.

La placa básica que se ofrece por la organización propietaria de la plataforma, es el Arduino UNO. La plataforma de hardware está basada en el microcontrolador ATmega328P e incluye todos los componentes electrónicos necesarios para que el sistema opere en los rangos estándar de tensión y corriente, de entrada y salida, que la plataforma ofrece [8]. Los rangos de operación y otras características del Arduino UNO se muestran en la tabla 3.1.

La plataforma está enfocada en proyectos de pequeño y mediano tamaño, que operan a baja potencia, como la automatización de pequeños sistemas de producción agrícola, control de circuitos en casas, elaboración de prototipos, entre otras. Si bien, al trabajar con Arduino se obtiene un mecanismo accesible, de fácil aprendizaje y flexible, no se recomienda en entornos industriales, de alta precisión o de electrónica de potencia [1]. En estos casos se recomiendan otras plataformas más robustas y dedicadas a la automatización industrial o al control de máquinas eléctricas, como PLCs, FPGAs, Delfino, entre otras.

3.1.1. Librerías

Como se mencionó previamente, el software de Arduino proporciona la ventaja de la utilización de librerías que facilitan la manipulación de las señales entregadas por los sensores. En adición a esto, algunas librerías también proporcionan otras funcionalidades, como mecanismos para el control de algunos dispositivos de salida, la comunicación entre placas de Arduino y computadores y, la conexión por medio de redes, como Ethernet, Wifi o Bluetooth.

Las principales librerías que se utilizarán para el desarrollo del proyecto, se describen brevemente en la tabla 3.2. Cada una de estas librerías presentan su documentación, misma que resulta de gran apoyo

Tabla 3.1: Características principales del Arduino UNO [1].

Parámetro	Valor
Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de operación (V)	5
Tensión de entrada recomendada (V)	7 - 12
Tensión de entrada límite (V)	6 - 20
Pines de entrada/salida digitales	14 (6 con PWM)
Pines de entrada analógicos	6
Corriente de salida, pines digitales (mA)	20
Corriente de salida, pin 3.3 V (mA)	50
Corriente máxima de salida (mA)	800
Memoria flash (kB)	32
Memoria SRAM (kB)	2
Memoria EEPROM (kB)	1
Velocidad del reloj (MHz)	16

cuando no se tiene experiencia previa utilizando la librería específica o no se conocen las funciones que incluye; por lo cual, en la descripción también se adjunta un enlace a la documentación.

3.2. Sensores

Para la medición de las variables de interés que se describen en el capítulo anterior, se realizó la selección y caracterización de diferentes sensores en base a los parámetros de entrada y salida del Arduino UNO descrito previamente. Además de observar que el mecanismo de operación de los sensores sea compatible con Arduino, se consideró que se cuente con la disponibilidad de los mismos en el laboratorio o bien, que su adquisición sea posible. En algunos casos, los sensores cuentan con librerías que facilitan la interpretación de los valores entregados, no obstante, estas librerías fueron incluidas en la sección previa, por lo que se omiten en este apartado.

3.2.1. Sensor de pH

Para la medición del pH en el agua, se seleccionó el sensor analógico lineal de pH “DFRobot’s Gravity: Analog pH meter V2”. Las características y rangos de operación, del sensor, se obtuvieron de la página web del fabricante [6] y se muestran resumidas en la tabla 3.3.

Debido a que la sonda de medición del pH entrega una señal eléctrica de tensión en el rango de los milivoltios, por medio de un conector tipo BNC, es necesario una placa para amplificar esta tensión a un valor en el rango de los volts (para evitar errores a causa del ruido) y entregarla por medio de un conector manejable para su conexión con el Arduino.

Tabla 3.2: Librerías de Arduino útiles para el proyecto.

Librería	Descripción	Documentación
Wire.h	Permite la comunicación con otros dispositivos, por medio del protocolo I2C	https://bit.ly/34rNW2d
EEPROM.h	Permite hacer uso de la memoria EEPROM del Arduino	https://bit.ly/2RN2gzM
SPI.h	Permite la comunicación sincrónica entre dispositivos periféricos	https://bit.ly/34rXSsn
RTClib.h	Permite el uso de relojes en tiempo real	https://bit.ly/3hXLp7W
LiquidCrystal_I2C.h	Controla el despliegue de datos en pantallas LCD, empleando el protocolo I2C	https://bit.ly/3c1vOAh
SD.h	Permite la lectura y escritura en tarjetas SD, con formato de archivos FAT16 y FAT32	https://bit.ly/3uCCVFU
DFRobot_EC.h	Permite la lectura y procesamiento de datos provenientes de sensores de conductividad eléctrica	https://bit.ly/3g8Dr9F
DFRobot_PH.h	Permite la lectura y procesamiento de datos provenientes de sensores de pH	https://bit.ly/3fUNT4o
DS18B20.h	Permite la lectura y interpretación de las señales digitales de los sensores de temperatura DS18B20	https://bit.ly/3yKWFKS
OneWire.h	Controla el acceso a dispositivos de un cable, como sensores de temperatura, memorias u otros	https://bit.ly/3jp4FM7

En adición a lo anterior, el sensor necesita ser calibrado de manera que su exactitud sea la mayor posible y, para ello, es necesario el uso de dos sustancias “buffer”, calibradas en 2 valores diferentes de pH (4 y 7 usualmente) y mediante los valores obtenidos al medir sus valores de pH, deducir una relación lineal entre la tensión y el pH, para corregir posibles desviaciones en la medición. Ventajosamente, el conjunto comercial mencionado incluye todos los componentes necesarios para su corrección y uso.

3.2.2. Sensor de conductividad eléctrica

Para la medición del nivel de conductividad eléctrica (EC) del agua, se seleccionó el sensor analógico “DFRobot Gravity: analog electrical conductivity meter V2”. Las características y rangos de operación, del sensor, se obtuvieron de la página web del fabricante [5]. Debido a que tanto el sensor de pH, como el de conductividad eléctrica del agua, son comercializados por el mismo fabricante y, presentan una gran similitud entre ambos, sus valores se muestran resumidos en la misma tabla 3.3 empleada anteriormente.

Al igual que para el sensor de pH, este sensor de conductividad eléctrica necesita de una placa para el preprocessamiento de la señal censada y la conversión entre conectores. También necesita de dos

Tabla 3.3: Características principales de los sensores de pH y conductividad eléctrica [5] [6].

Parámetro	Sensor de pH	Sensor de EC
Tensión de alimentación (V)	3,3 ~ 5,5	3 ~ 5
Tensión de salida (V)	0 ~ 3	0 ~ 3,4
Conector de la sonda a la placa	BNC	BNC
Conector de la placa al Arduino	PH2.0-3P	PH2.0-3P
Rango de medición de pH	0 ~ 14	N/A
Precisión de la medición de pH, a 25 °C (pH)	±0,1	N/A
Rango de medición de EC (mS/cm)	N/A	0 ~ 20
Precisión de la medición de EC, a 25 °C (%)	N/A	± 5
Rango de temperatura (°C)	5 ~ 60	0 ~ 40
Tiempo de respuesta (s)	< 120 s	N/A
Vida útil (años)	> 0,5 años	> 0,5 años

sustancias “buffer” con valores específicos (1.413 mS y 12.88 mS) para su calibración. De igual manera, el conjunto a emplear incluye todos los componentes necesarios para su ajuste y uso.

3.2.3. Sensor de temperatura

Con el objetivo de obtener una medición exacta de la temperatura del agua del sistema, se seleccionó la versión comercial del sensor digital de temperatura, con resolución programable, DS18B20. La variación del sensor seleccionada cuenta con las ventajas de incluir un encapsulado de acero inoxidable a prueba de agua y, un adaptador para los cables de salida del sensor. Para la correcta operación, el sensor necesita un resistor de “pull up” entre la terminal de datos y la de alimentación, sin embargo, el adaptador incluye estos resistores en su placa, por lo que se evita la necesidad de colocarlos.

Las características y condiciones de operación del sensor se recopilaron de las páginas 1, 5, 24 y 25, de la hoja de fabricante del dispositivo propiedad de Dallas Semiconductor; la cual se observa en el apéndice A.1. El resumen de estas características se muestra en la tabla 3.4.

3.2.4. Sensores de nivel

Para la implementación de los sensores de nivel que se colocan en el tanque de almacenamiento de agua, se eligió utilizar dos interruptores de nivel de líquido, de montaje superficial [4]. La versión comercial de estos interruptores está basada en un interruptor de lengüeta (reed switch, en inglés), los cuales se comportan como contactos normalmente abiertos y, se cierran en presencia de un campo magnético. En la figura 3.1 se observa un ejemplo del interruptor mencionado, con sus componentes indicados.

En adición a lo anterior, en la tabla 3.5 se resumen las principales características de los interruptores tratados. La información fue obtenida de la hoja de fabricante del dispositivo propiedad de la compañía

Tabla 3.4: Características principales del sensor de temperatura digital DS18B20.

Parámetro	Valor
Tensión de alimentación (V)	3 ~ 5,5
Tensión de salida (V)	-0,3 ~ 5,5
Rango de medición (°C)	-55 ~ 125
Precisión de la medición, entre -10 °C y 85 °C (°C)	±0,5
Precisión de la medición, entre -55 °C y 125 °C (°C)	±2
1 lógico de entrada o salida (V)	> 2,2
0 lógico entrada o salida (V)	< 0,8
Corriente en estado activo (mA)	1,5
Tiempo máximo de respuesta (ms)	< 750

Horizontal Type:

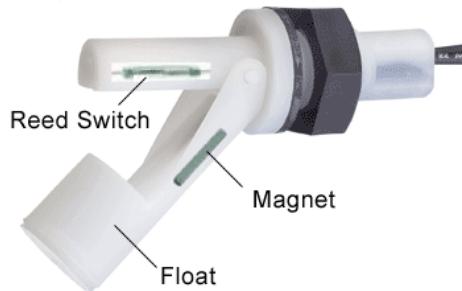


Figura 3.1: Interruptor flotante de montaje lateral [4].

Omega, la cual se observa en el apéndice A.2.

3.3. Actuadores

Una vez definido el mecanismo para la lectura de las variables a controlar en el sistema, es necesaria la utilización de dispositivos que modifiquen sus valores. Para cumplir esta tarea, en la presente sección se detallan los diferentes componentes a emplear para manipular las variables físicas, a partir de las variables eléctricas resultantes de los algoritmos de control. A diferencia del caso de los sensores, para los actuadores seleccionados no es necesario el uso de librerías de Arduino para su control.

Tabla 3.5: Características principales del interruptor de nivel de líquido, de montaje superficial.

Parámetro (interruptor)	Valor
Tensión máxima (V)	100
Corriente máxima (A)	0,5
Potencia aparente máxima (VA)	20
Temperatura máxima (°C)	107

Tabla 3.6: Características principales de la bomba difusora de diafragma.

Parámetro	Valor
Tensión (V DC)	6 ~ 12
Corriente (A)	0,5 ~ 0,7
Caudal máximo (mL/s)	16,6 ~ 50
Altura máxima de succión (m)	2
Altura máxima de expulsión (m)	3

Tabla 3.7: Características principales de la bomba sumergible para la circulación del agua.

Parámetro	Valor
Tensión (V AC)	120
Corriente (A)	0,49
Potencia (W)	30
Caudal máximo (L/s)	20
Altura máxima (m)	1,99

3.3.1. Bombas dosificadoras

Las bombas dosificadoras cumplen tres funciones en el sistema: la adición de las soluciones nutritivas A y B y, y la adición del agua neutra para compensación de cambios en el volumen total. Para estas tareas, se escogió emplear bombas de diafragma modelo R385, cuyas características principales se observan resumidas en la tabla 3.6. La información del dispositivo fue obtenida de su hoja del fabricante, la cual se anexa en el apéndice A.3.

3.3.2. Bomba de circulación

Si bien las bombas descritas previamente cumplen de manera adecuada la tarea de dosificar pequeñas cantidades de líquidos, para el caso de la circulación del agua por el sistema, el caudal que entregan estas bombas se queda excesivamente corto, por esta razón, se decidió emplear una bomba sumergible para fuentes decorativas de jardín. Las características de la bomba en cuestión fueron obtenidas de la página 3 del documento de especificaciones del fabricante anexado en el apéndice A.4 y, se resumen en la tabla 3.7.

Es de gran importancia que la bomba sea sumergible ya que estas poseen la capacidad de ser refrigeradas por el mismo líquido que hacen circular (para este caso, agua) y producto de que la bomba se mantendrá en funcionamiento permanente durante las 24 horas diarias, se reducen las posibilidades de

Tabla 3.8: Características principales del calentador de agua sumergible.

Parámetro	Valor
Tensión (V AC)	120
Potencia (W)	1000
Material	Cobre
Tamaño total (m)	0,30

falla por sobrecalentamiento.

3.3.3. Calentador de agua

Para el control de la temperatura del agua, en conjunto con el sensor de temperatura antes descrito, se eligió un calentador de agua sumergible. En base a la información entregada por el comerciante que distribuye el producto [7], en la tabla 3.8 se resumen las principales características del componente. Cabe resaltar que el dispositivo no tiene la capacidad de reducir la potencia consumida, característica que deberá ser contemplada al momento de la instalación, con el fin de evitar inconvenientes por sobrecalentamiento.

3.3.4. Relés de estado sólido

Si bien los relés de estado sólido no son componentes que modifiquen directamente las variables controladas, son los encargados de la conversión de las señales de control de baja potencia del Arduino, en señales de alta potencia que activan los diferentes actuadores. Los relés seleccionados en este caso se basan en transistores, los cuales son operados en sus regiones de saturación, por lo que se comportan de manera equivalente a un interruptor eléctrico.

A diferencia de los relés tradicionales, utilizables para este caso, los cuales están conformados por un contacto magnético y una bobina de activación y, consumen una corriente típicamente alta (20 mA), para un pin digital de Arduino; los relés de estado sólido no utilizan partes móviles y su corriente de activación es mucho menor (entre 2 mA y 7,5 mA), lo cual conveniente para este caso.

Debido a la necesidad de controlar cargas que operan tanto en corriente continua, como en corriente alterna, se requiere el uso de dos variantes diferentes de relés. Se decidió emplear los relés de estado sólido de la serie SSR de la compañía FOTEK, de los cuales se seleccionó el modelo “SSR-25 DD” para las cargas de corriente continua y, el modelo “SSR-25 DA” para las cargas restantes; ambos modelos utilizan corriente continua para su activación.

La información de los componentes se obtuvo de la hoja del fabricante anexada en el apéndice A.5 y sus características de relevancia se resumen en el cuadro 3.9.

3.4. Componentes adicionales

De manera complementaria a las capacidades de sensado y manipulación de variables, proporcionadas por los sensores y actuadores descritos en las secciones previas, se planteó el uso de algunos compo-

Tabla 3.9: Características principales de los relés de estado sólido.

Parámetro	SSR-25 DD	SSR-25 DA
Tensión de entrada (V)	3 ~ 32	3 ~ 32
Corriente de entrada a 5 V (mA)	2.8	2.8
Tensión de la carga (V)	5 ~ 200	24 ~ 380
Corriente de la carga (A)	25	25
Caída de tensión en la salida, a 25 °C (V)	1.6	1.6
Corriente de dispersión en la salida (mA)	3	3

nentes adicionales, que ofrecen diferentes funcionalidades ventajosas para el desarrollo del sistema de control.

Si bien los componentes detallados a continuación no son indispensables para la operación del sistema final, el uso de ellos facilita en gran medida tanto el control de referencias temporales para los algoritmos a implementar, como el guardado de datos para su posterior análisis y, el despliegue de los mismos en tiempo real, para conocimiento del usuario. Las librerías necesarias para el control de estos componentes, fueron detalladas previamente en la tabla 3.2, en la que también se encuentran los enlaces a las documentaciones necesarias.

3.4.1. Reloj en tiempo real

Para obtener una referencia temporal en el software, se emplean los relojes en tiempo real, para el caso actual se decidió emplear el módulo para Arduino “DS3231”, el cual incluye un reloj en tiempo real de precisión con soporte para batería externa de botón de 3 V. Los relojes en tiempo real entregan un valor de incremento temporal, el cual es recibido por el Arduino e interpretado por una librería específica que le proporciona una referencia y, de esta manera, se obtiene que en conjunto la fecha y hora actualizada en base a la referencia empleada.

Además, la principal característica que ofrecen estos componentes es mantener esta referencia temporal aun si no se encuentran energizados (gracias a la batería externa), de manera que, ante cortes inesperados o intermitentes en la alimentación, se logra mantener la fecha y hora actualizada. Sin embargo, no es recomendado dejar los dispositivos fuera de operación por largos períodos de tiempo (mayores a 3 o 4 días), ya que en estos casos tienden a perder la referencia almacenada.

3.4.2. Pantalla LCD

Para el despliegue de los datos en tiempo real, se decidió hacer uso de una pantalla LCD de 16x2 con comunicación I2C y luz de fondo azul. El tono de la luz de fondo no tiene mayor importancia para efectos prácticos, sin embargo, es destacable que el nivel de luminosidad es ajustable por medio de un potenciómetro integrado, de manera que se puede corregir en base a la luz externa y al contraste deseado. Para el caso de la comunicación I2C integrada, esta si proporciona claros beneficios en la

utilización del componente, entre los cuales destaca como principal, el propiciar una mayor facilidad en la conexión entre la pantalla y la placa de Arduino, empleando menos pines para su funcionamiento.

A parte de las características que se pueden obtener de la librería correspondiente (ver tabla 3.2), la información acerca de la conexión y el manejo de las pantallas LCD 16x2 I2C, se puede ampliar con la información descrita entre las páginas 230 y 234 de [8].

3.4.3. Tarjeta SD

Con el objetivo de automatizar la recolección de datos para su análisis, se decidió el uso de un módulo para tarjeta SD con protocolo de comunicación SPI. El módulo en conjunto con su librería correspondiente, permiten la escritura de texto plano en la tarjeta SD de una manera sencilla, lo cual permite crear archivos con formatos de exportación de datos (como CSV, TSV u otros) que pueden ser procesados y graficados posteriormente.

En conjunto con el módulo, es necesario adquirir una tarjeta microSD con adaptador para que sea compatible con entradas de tarjeta SD. La decisión de emplear esta combinación de tarjeta con adaptador se fundamenta en dos motivos: el mayor costo del módulo para tarjeta microSD y la mayor compatibilidad que ofrecen las tarjetas SD sobre las estas últimas; sin embargo, para efectos prácticos de funcionamiento, ambas opciones se desempeñan de manera adecuada.

Al igual que para el caso anterior, además de las características que se pueden obtener de la librería correspondiente (ver tabla 3.2), la información acerca de la conexión y uso de las tarjetas SD, se puede ampliar con la información descrita entre las páginas 257 y 270 de [8].

Capítulo 4

SISTEMA DE SENSADO, ACTUACIÓN Y ALGORITMO DE CONTROL

Para la solución del problema planteado, tal y como se adelantó en las secciones previas, fue necesario el diseño y la implementación de un sistema de medición, actuación y control de las principales variables del sistema. En la figura 4.1 se observa el diagrama de bloques del proyecto, el cual brinda una perspectiva general del diseño. Este diseño se divide en 4 etapas: sistema de medición, sistema de actuación, componentes adicionales y, plataforma de control, cada una de ellas se encuentra señalada en el diagrama y; en este capítulo se detallan los diseños para las conexiones de sus componentes y la lógica general de control.

4.1. Sistema de medición

Para el sistema de medición, se emplearon los sensores descritos en el capítulo 3 y se conectaron tal y como se muestra en el diagrama de la figura 4.2. En la figura se observan los módulos de conexión para los sensores de temperatura, pH y conductividad eléctrica (EC), así como una representación de las sondas de cada sensor. Estos módulos y sondas se incluyen en conjunto con la compra del sensor, por lo cual, no se detalla su construcción. El diagrama está conformado por modelos simbólicos de los componentes y su objetivo es exemplificar la conexión eléctrica de los mismos, por lo cual, se pueden presentar variaciones en sus características físicas y proporciones.

En el caso de los sensores de nivel alto y bajo, de líquido, se desarrolló una topología sencilla la cual brinda tres valores de tensión en función de las combinaciones en las cuales se activan los interruptores que lo conforman. Esta configuración hace uso de 2 resistores (R) adicionales, cuyo valor se seleccionó en $22\text{ k}\Omega$, de manera que se consume una corriente máxima de 0.227 mA .

Para el adecuado funcionamiento del conjunto y de la bomba de circulación, garantizando que el nivel del agua no sea menor al mínimo requerido por la bomba, ni supere el máximo del tanque de almacenamiento (calculado en capítulo 2), se colocó el sensor de nivel bajo a una altura de 8 cm sobre el fondo del tanque y, para el sensor de nivel alto, se decidió colocar 8 cm por debajo de la entrada del desagüe de los niveles superiores; lo cual se traduce en una altura de 12 cm desde el fondo del tanque.

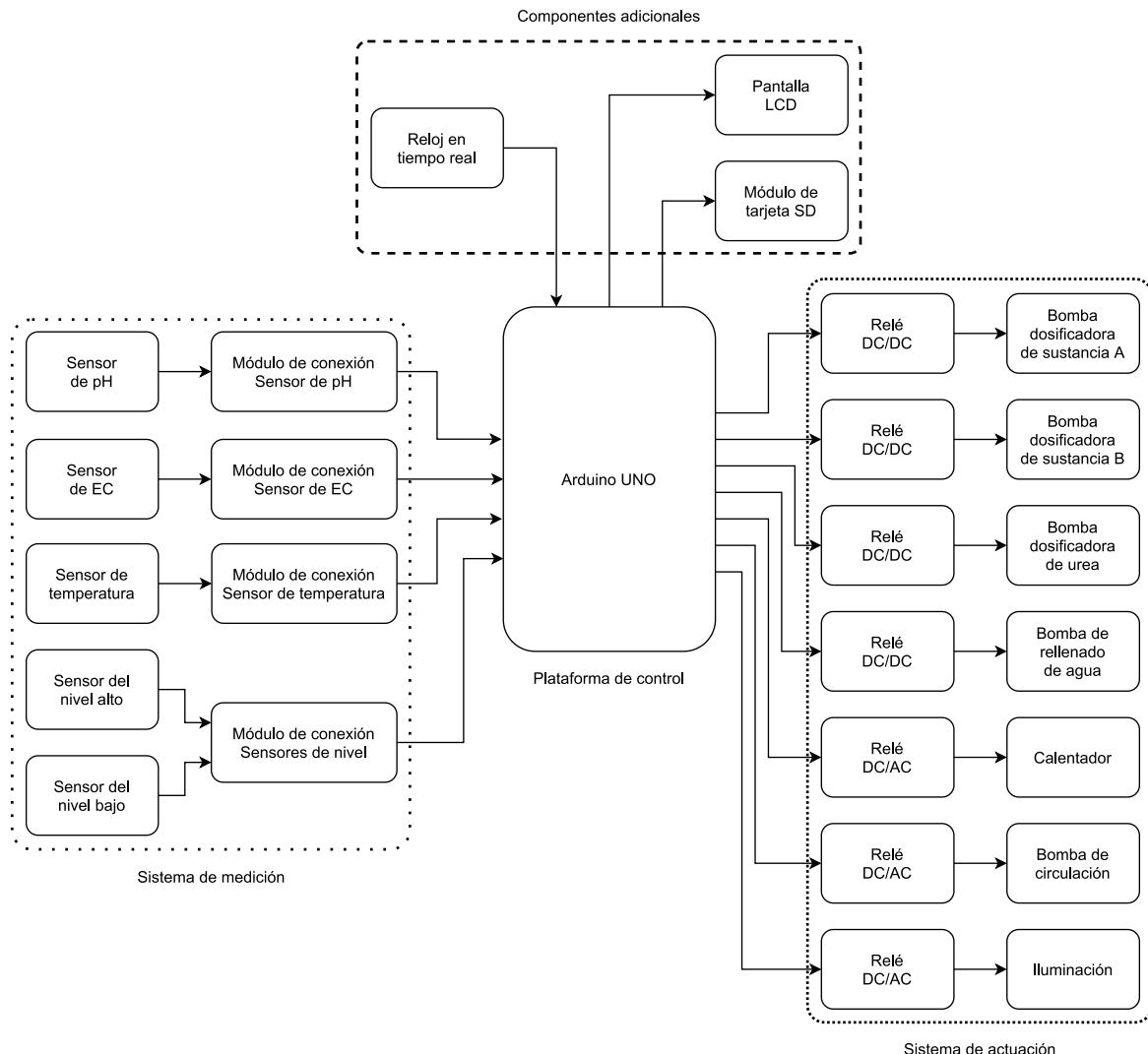


Figura 4.1: Diagrama de bloques general del sistema implementado [Elaboración propia].

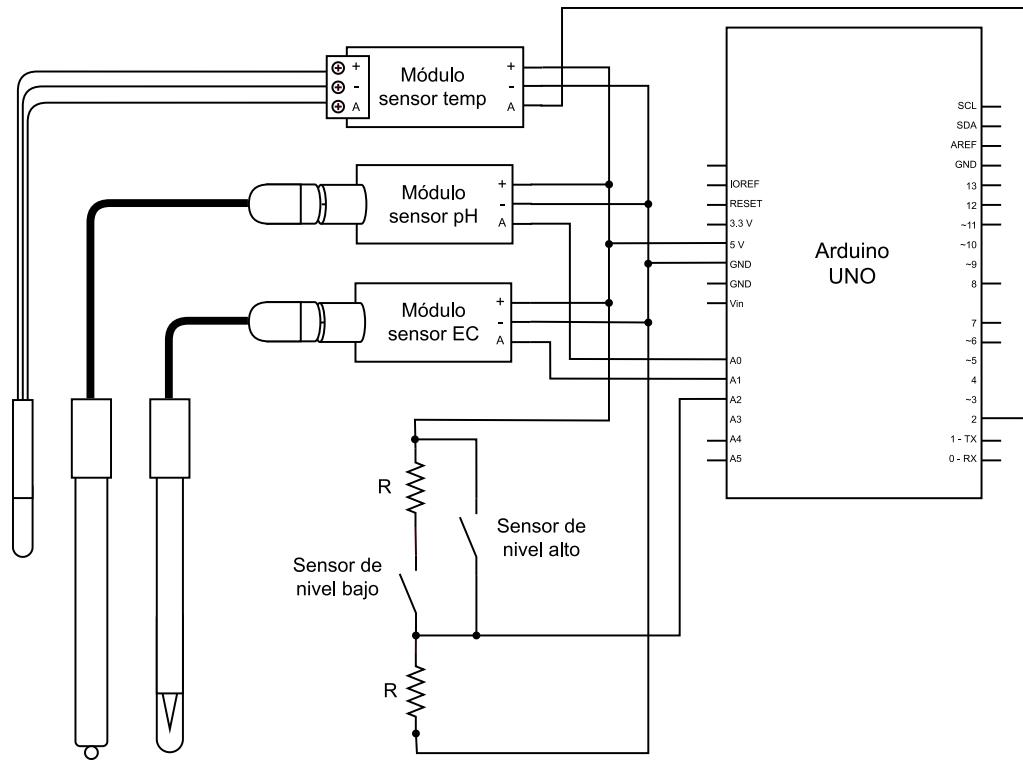


Figura 4.2: Diagrama eléctrico del sistema de medición [Elaboración propia].

Es de gran importancia resaltar que el sensor de la parte alta del tanque se debe mantener abierto cuando el nivel del agua esté por debajo de él y, cerrarse cuando el nivel de agua lo alcance. Caso contrario debe ocurrir con el sensor de la parte baja, este debe cerrarse cuando el nivel esté por debajo de él y, abrirse cuando este lo supere. En el diagrama de la figura 4.3 se observa un ejemplo de la distribución de los sensores en el tanque, con lo cual, se puede observar con mayor claridad el comportamiento inverso de los sensores de nivel.

Finalmente, para conocer los valores de tensión que entrega el conjunto de sensores de nivel (en la terminal A2 del Arduino) y aclarar las circunstancias del nivel del agua en cada caso, se elaboró la tabla 4.1, en la cual se muestran las combinaciones de entradas posibles, las salidas de tensión calculadas y, una pequeña descripción del nivel del agua; en cada caso. Cabe destacar que, en el circuito, se utilizaron resistores con una tolerancia del 10 %, por lo cual, las tensiones de salida encontradas pueden presentar variaciones de $\pm 10\%$ como máximo.

En adición a lo anterior, se resalta que la condición en la cual ambos interruptores se encuentran cerrados, no puede ocurrir físicamente (bajo circunstancias normales), ya que representaría que el agua flota en el aire y únicamente cubre el sensor de la parte alta; por esta razón, esa condición de salida se denota con una "x".

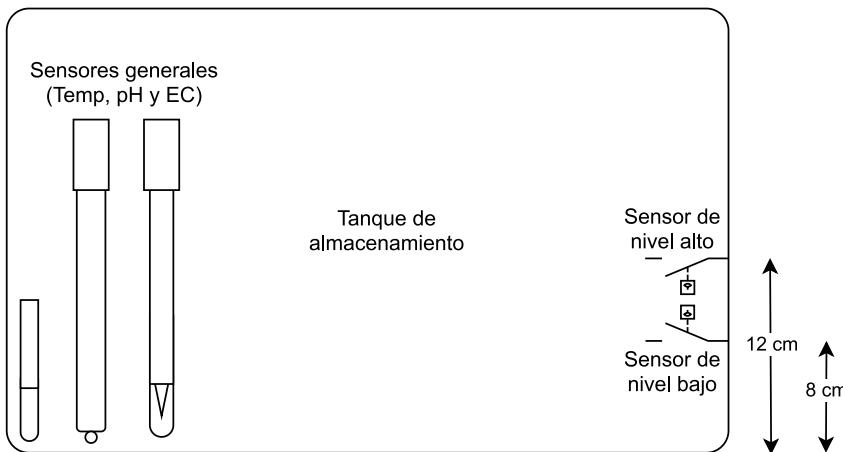


Figura 4.3: Ubicación de los sensores en el tanque de almacenamiento del sistema [Elaboración propia].

Tabla 4.1: Comportamiento del circuito para los sensores de nivel.

Sensor alto	Sensor bajo	Salida (V)	Descripción
OFF	OFF	0	Nivel del agua en medio de ambos sensores
OFF	ON	2.5	Nivel del agua igual o inferior del sensor bajo
ON	OFF	5	Nivel del agua igual o superior del sensor alto
ON	ON	x	Caso no aplicable en la realidad

4.2. Sistema de actuación

De manera similar al sistema de medición, el sistema de actuación se realizó con los componentes descritos en el capítulo 3 y, la conexión eléctrica de los mismos se observa en la figura 4.4. Se resalta que la fuente de corriente continua mostrada en el diagrama, denominada como “Fuente DC”, representa el adaptador AC/DC de 120/12 V utilizado para alimentar el circuito general; además, la fuente de alimentación AC corresponde con la red general del edificio (tomacorrientes). El diagrama está conformado por modelos simbólicos de los componentes y su objetivo es ejemplificar la conexión eléctrica de los mismos, por lo cual, se pueden presentar variaciones en sus características físicas y proporciones.

Además de los detalles anteriores, la ubicación de las salidas de los actuadores en el tanque de almacenamiento del agua es de suma importancia. En base al código desarrollado, el cual se detalla posteriormente y, al comportamiento de la disolución de sustancias en el agua del sistema, se deben ubicar las salidas mencionadas cerca de los sensores, de manera que los cambios locales en los parámetros del agua sean sensados de manera pronta por el sistema de control, previniendo aumentos desmedidos en los niveles.

En el código se toma una medida de contención para el problema de la homogeneización de las soluciones en el agua, la cual consiste en efectuar las acciones correctivas (tanto para temperatura,

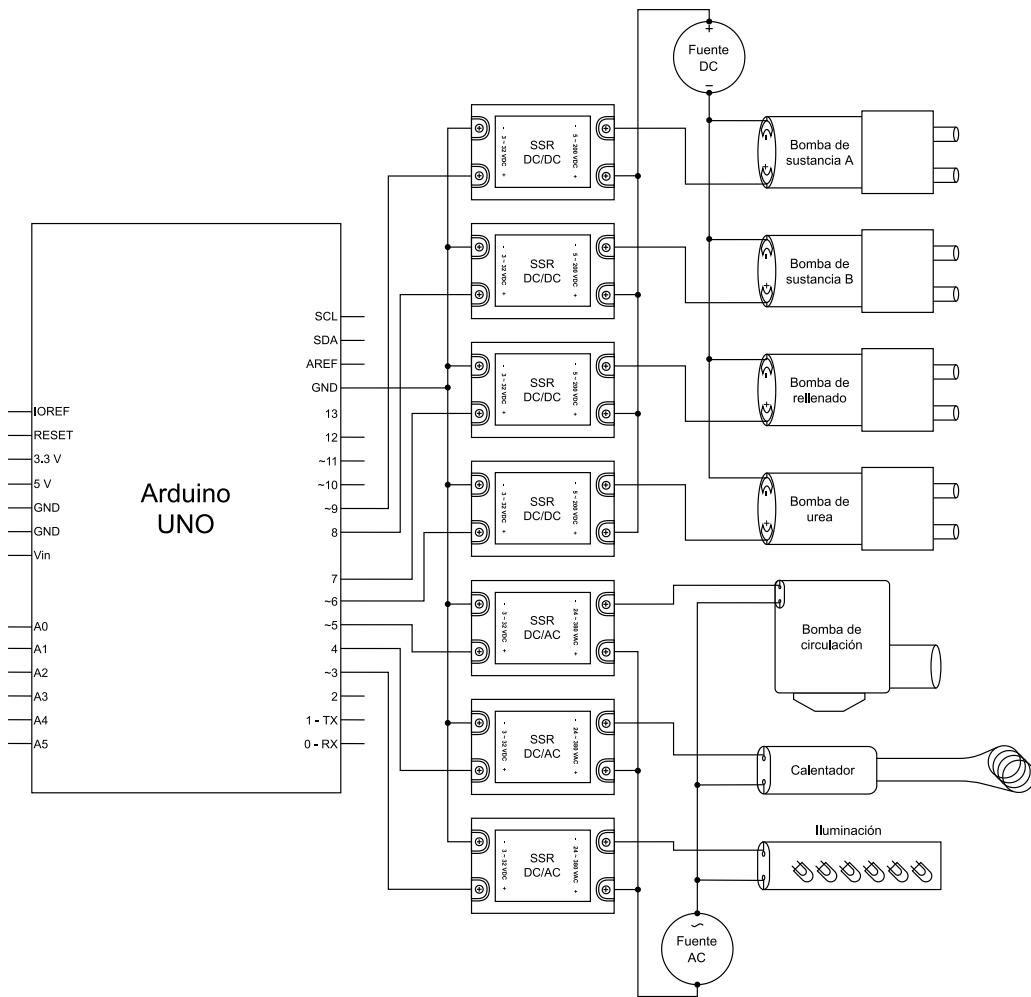


Figura 4.4: Diagrama eléctrico del sistema de actuación [Elaboración propia].

como para pH y para conductividad eléctrica) únicamente cuando la circulación del agua esté activa, para propiciar la mezcla de las sustancias. Sin embargo, se recomienda colocar los componentes como se mencionó previamente, de manera que, si la mezcla de las sustancias en el agua es tardada, los sensores detecten los cambios locales en los parámetros del agua, evitando que los valores suban de manera desmedida producto de un retardo entre el cambio y su percepción.

4.3. Componentes adicionales

Continuando con el esquema general de implementación, en la figura 4.5 se observa el diagrama eléctrico para la conexión de los componentes adicionales empleados. Para la conexión de la pantalla LCD 16x2 con protocolo I2C, se utilizó como referencia las páginas 230 y 231 de [8]. De manera análoga,

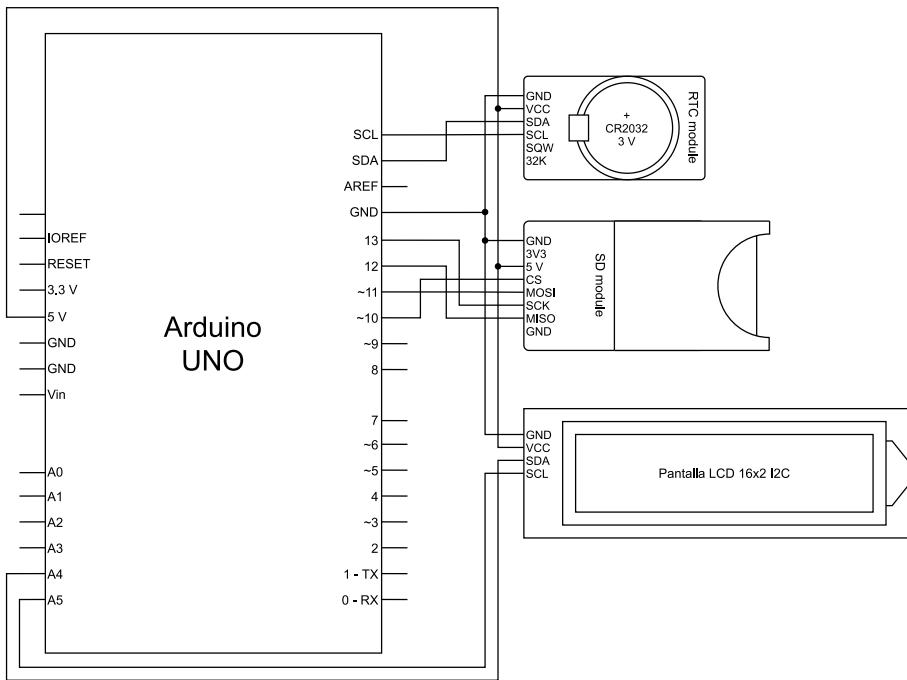


Figura 4.5: Diagrama eléctrico de los componentes adicionales [Elaboración propia].

para el caso del módulo de tarjeta SD, se usó la pagina 270 de [8] como referencia y, en este caso, es necesario reconocer las terminales “DO”, “DI” y “CLK” descritas en el texto, como “MISO”, “MOSI” y “SCK” respectivamente; ya que el módulo de tarjeta SD empleado presenta esta variante de la notación.

Para el caso del reloj en tiempo real DS3231, se utilizó la información mostrada en la sección “How to Use a Real-Time Clock Module (DS3231)” de [1].

4.4. Algoritmo de control

Posterior al planteo electrónico anterior, mediante el cual se permite el sensado y modificación de las variables de interés, se desarrolló el programa que se ejecutará en el Arduino. El código implementado permite la toma de decisiones en base a las señales eléctricas entregadas por los sensores, la escritura de los mismos en la tarjeta SD, el despliegue de los valores más importantes (pH, conductividad eléctrica y temperatura) en la pantalla LCD y; la entrega de señales eléctricas para la activación de los actuadores.

Para lograr las funcionalidades anteriores, se inició por incluir las librerías necesarias, tal y como se muestra a continuación:

```

1 /*
2  * Libraries used in the project
3 */
4 #include <Wire.h>

```

```

5 #include <EEPROM.h>
6 #include <SPI.h>
7 #include <RTClib.h>
8 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
9 #include <SD.h>
10 #include <DFRobot_EC.h>
11 #include <DFRobot_PH.h>
12 #include <DS18B20.h>
13 #include <OneWire.h>
```

Una vez incluidas las librerías, se continuó con la definición de variables para los pines de entrada y salida, de las señales eléctricas. Estas variables simplifican la tarea de manipular los pines de entrada y salida dentro del código, ya que no se necesario recordar en todo momento el dispositivo conectado en cada terminal, únicamente el nombre asignado. La implementación se observa a continuación:

```

15 /*
16  * Variables definition for input/output pins
17 */
18 // Input pins definition
19
20 #define pinTemp 2          // Temperature sensor
21 #define pinPH A0           // PH sensor
22 #define pinEC A1           // Electrical conductivity sensor
23 #define pinLevel A2         // Water level sensor
24 #define pinSD 10            // CS pin of the SD card module
25
26 // Output pins definition
27
28 #define pinLight 3          // System lights
29 #define pinHeater 4          // Water heater
30 #define pinCpump 5           // Water circulation pump
31 #define pinUpump 6           // Urea dosing pump
32 #define pinLpump 7           // Level compensation water pump
33 #define pinBpump 8           // B substance dosing pump
34 #define pinApump 9           // A substance dosing pump
```

Luego, se definieron las variables necesarias en las cuales colocar los valores deseados para los parámetros del sistema, mismos que pueden ser modificados por el encargado de la puesta en práctica del conjunto, en función de los requerimientos de producción. Las variables contempladas son: hora de encendido y apagado de la iluminación del sistema, periodo de circulación del agua, valor mínimo de temperatura, valor máximo de pH y; valor mínimo de conductividad eléctrica del agua. Es de resaltar que, a pesar de realizar el control de las variables empleando únicamente mínimos o máximos, el valor real de la variable en cuestión es cercano al límite. A continuación, se observa la sección del código en cuestión:

```

36 /*
37 * System parameters
38 * Change the values, depending on the needs of the crops
39 * produced and the environmental characteristics
40 */
41 int dawn = 8;           // Hour at the lights turn on
42 int nightfall = 20;     // Hour at the lights turn off
43
44 int period = 15;        // Period when water circulation pump is
   on. It can be 10, 15 or 30 mins
45
46 float Tmin = 17;        // Desired temperature value
47 float PHmax = 6.5;      // Maximun pH value
48 float ECmin = 1.3;      // Minimun EC value
49
50 int displayData = 2;    // Period in minutes, between screen
   updates
51 int writeData = 10;      // Period in minutes, between data writing

```

En conjunto con los valores deseados que se almacenan en las variables previas, se define un conjunto de parámetros internos, por medio de los cuales se realiza la lógica de control del sistema. Estos valores no deben ser modificados por el encargado del sistema, bajo circunstancias típicas, a excepción casos específicos en los cuales se deseen funcionalidades diferentes o, se requiera emplear sensores o actuadores con mecanismos de operación diferentes a los propuestos en el proyecto.

```

53 /*
54 * Control variables
55 * Change the values, depending on the performance of the control
   algorithm
56 */
57
58 float tA = 8;           // Dosing time constant for substance A
59 float tB = tA/4;         // Dosing time constant for substance B
60
61 // Auxiliary variables of the control algorithm
62
63 bool lightsON = false;   // Flag to indicate that the lights
   are on
64 bool cPumpON = false;    // Flag to indicate that the water
   circulation pump is on
65 int Lvalue = 0;          // Read water level value
66 float PHvalue = 7.0;     // Read pH value
67 float ECvalue = 1.5;     // Read EC value

```

```

68 float Tvalue = 25;           // Read temperature value
69 DateTime rightNow;          // Current day and hour
70 long start = 0;             // Auxiliar variable for pump A and
    B activation
71 long displayAux = 130000;    // Auxiliar variable for screen
    displaying
72 long writeAux = 610000;      // Auxiliar variable for writing to
    SD card

```

Para finalizar el preámbulo del código, se definieron las variables necesarias para emplear las diferentes funciones definidas en las respectivas librerías.

```

74 /*
75  * Variables for the libraries functionalities
76  */
77 LiquidCrystal_I2C screen(0x27, 16, 2);      // LCD screen
78 File data;                                    // SD card file
79 RTC_DS3231 rtc;                            // Real time clock
80 DS18B20 DS(pinTemp);                      // Temperature sensor
81 DFRobot_PH pH;                           // PH sensor
82 DFRobot_EC EC;                           // EC sensor

```

Una vez declaradas todas las variables globales a emplear, se definieron las funciones que se encargan de ejecutar propiamente las diferentes funcionalidades planteadas. La primera de ellas tiene como objetivo inicializar la pantalla LCD 16x2 I2C colocada, mostrando a su vez un corto mensaje que hace referencia al proyecto como tal. Seguidamente se muestra dicha función:

```

84 /*
85  * Function for the initialization of the screen.
86  * It turn on the backlight of the screen and display the initial
     message
87 */
88 void initScreen() {
89
90     screen.init();
91     screen.backlight();
92     screen.begin(16, 2);
93     screen.home();
94
95     screen.print(F("      SISTEMA"));
96     screen.setCursor(0, 1);
97     screen.print(F("  HIDROPONICO"));
98
99     delay(2000);

```

100 }

De manera similar a la sección de código previa, la siguiente de las funciones se encarga de inicializar la tarjeta SD. Como parte de sus funciones, se encarga de abrir un archivo de texto en la tarjeta, bajo el nombre de “datos.txt”, en modalidad de escritura y, en caso de que el archivo no exista, lo crea. Además, verifica que esta acción se realice de manera correcta y, en caso de no detectar una tarjeta SD o de que su apertura sea incorrecta, despliega un mensaje en la pantalla. Finalmente, si se encuentra una tarjeta SD en el módulo añadido y, el archivo fue abierto (o creado, si fuese necesario) de manera adecuada, imprime un encabezado en formato “CSV” para la identificación de los datos que posteriormente se guardarán en ella.

```

102 /*
103  * Initialization of the SD card
104  * It open the data file of the SD and writes on the data header
105  * If the file does not exist, it is created
106 */
107 void initSDcard() {
108
109     data = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);
110
111     screen.clear();
112
113     while ( !data ) {
114
115         screen.home();
116         screen.print(F("INSERTE TARJETA"));
117         screen.setCursor(0, 1);
118         screen.print(F(" SD Y REANUDE"));
119
120     }
121
122     data.print(F("Fecha,"));
123     data.print(F("Hora,"));
124     data.print(F("pH,"));
125     data.print(F("Conductividad eléctrica (mS/cm),"));
126     data.print(F("Temperatura (°C),"));
127     data.println(F("Nivel del agua"));
128
129     data.close();
130 }
```

Posterior a la inicialización de la pantalla LCD 16x2 I2C y del módulo de tarjeta SD, se puede hacer uso de los mismos para mostrar y guardar los datos recolectados por los sensores. Para cumplir estas tareas, se implementaron las siguientes dos funciones.

La primera de ellas se encarga de desplegar en la pantalla, los valores de pH, conductividad eléctrica y temperatura, almacenados en las variables globales correspondientes. Se resalta que, para los valores de pH y conductividad eléctrica, se utilizan dos cifras decimales, asimismo, para el valor de temperatura únicamente una; logrando así obtener una incertidumbre adecuadamente baja en las mediciones, dentro de las capacidades de los sensores empleados.

```

132 /*
133 * Screen display
134 * Writes the measured values of pH, electrical
135 * conductivity and temperature on the LCD screen
136 */
137 void displayOnScreen(){
138
139     screen.clear();
140     screen.home();
141     screen.print(F(" PH EC TEMP"));
142     screen.setCursor(0, 1);
143     screen.print(" ");
144     screen.print(PHvalue, 2);
145     screen.print(" ");
146     screen.print(ECvalue, 2);
147     screen.print(" ");
148     screen.print(Tvalue, 1);
149
150 }
```

La segunda de las funciones se encarga de escribir en el archivo correspondiente dentro de la tarjeta SD, los valores recolectados. En la tarjeta se guardan, además de los valores desplegados en pantalla, la fecha y hora en que fueron capturados y, una interpretación del nivel del agua en el tanque. Este último parámetro puede tomar 3 valores, los cuales son interpretados en el código e indicados con las palabras “mínimo”, “normal” o “máximo”. Cuando el nivel del tanque se encuentra igual o inferior al sensor de nivel bajo, se interpreta como mínimo, cuando este se encuentra igual o superior al nivel alto, se denota como máximo y; en el caso intermedio se entiende como normal.

```

152 /*
153 * SD card writing
154 * Writes the current date and time, with the measured values of
155 * pH, electrical conductivity, temperature and tank level on the
156 * SD card, using the .csv format
157 */
158 void writeSD() {
159
160     data = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);
161 }
```

```

162 if( data ){
163
164     // Prints the current date and hour
165     char buffer [26] = "DDD DD MMM YYYY, hh:mm:ss";
166     data.print(rightNow.toString(buffer));
167     data.print(",");
168
169     // Prints the pH value with 2 decimal places
170     data.print(PHvalue, 2);
171     data.print(",");
172
173     // Prints the EC value with 2 decimal places
174     data.print(ECvalue, 2);
175     data.print(",");
176
177     // Prints the temperature value with 1 decimal places
178     data.print(Tvalue, 1);
179     data.print(",");
180
181     // Interpretation of the level value for better understanding
182     if( Lvalue > 818 ) data.print("Máximo");
183
184     if( (409 < Lvalue) && (Lvalue < 613) ) data.print("Mínimo");
185
186     if( Lvalue < 50 ) data.print("Normal");
187
188     data.println("");
189
190 }
191 data.close();
192 }

```

Luego del preámbulo (variables globales) y las funciones referentes a los componentes adicionales, se implementaron las funciones encargadas de ejecutar los principales algoritmos del sistema: el control de la iluminación, la circulación del agua en el sistema y, el control de los parámetros del agua.

Primeramente, se muestra la función encargada de controlar la iluminación. Para realizar el encendido de las luces, el código verifica dos condiciones: que las luces se encuentren apagadas y, que la hora actual sobrepase la hora de encendido deseada. De manera análoga, para realizar el apagado de las luces se revisa que las luces se encuentren encendidas y que la hora actual sobrepase la hora deseada para el apagado. De esta manera, se logra enviar la señal de encendido o apagado una única vez, en el momento requerido.

```
194 /*
```

```

195 * System lights control
196 * Turns the system lights on, if they are off and it is about the
197 * activation hour. It also turns the system lights off, if they
198 * are on and it is about the deactivation hour
199 */
200 void lights() {
201
202     if( (rightNow.hour() >= dawn) && !lightsON ) {
203
204         digitalWrite(pinLight, HIGH);
205         lightsON = true;
206     }
207
208     if( (rightNow.hour() >= nightfall) && lightsON ) {
209
210         digitalWrite(pinLight, LOW);
211         lightsON = false;
212     }
213
214 }
```

Posteriormente, se muestra la función encargada de controlar la activación de la bomba de circulación. Esta hace uso de la hora actual del día y el valor del periodo de riego deseado. Para activar la bomba, la función compara si el valor de minutos actuales es cero o múltiplo impar del periodo, caso en el cual la bomba es encendida. Para el caso de la desactivación de la bomba, se aplica el mismo procedimiento, con la diferencia de que se revisa si el valor de los minutos es múltiplo par del periodo, lo cual permite la desactivación de la bomba.

De esta forma, se logra activar la bomba de circulación del agua de manera periódica y simétrica. Cabe destacar que este algoritmo fue diseñado para períodos de riego de 10, 15 o 30 minutos, por lo cual, usar otros valores puede provocar comportamientos asimétricos en el periodo de activación de la bomba.

```

216 /*
217 * Circulation pump control
218 * The circulation pump turns on at the even multiples of the time
219 * constant and turns off at its odd multiples. It is designed for
220 * 10, 15 or 30 minute intervals
221 */
222 void circulationPump() {
223
224     if( (rightNow.minute() == 0) || (rightNow.minute() == 2*period)
225         || (rightNow.minute() == 4*period) ) {
```

```

226     digitalWrite(pinCpump, HIGH);
227
228     cPumpON = true;
229 }
230
231 if( (rightNow.minute() == period) || (rightNow.minute() ==
232     3*period) || (rightNow.minute() == 5*period) ) {
233
234     digitalWrite(pinCpump, LOW);
235
236     cPumpON = false;
237
238 }
```

Finalmente, la última de las funciones implementadas es la que se encarga de mantener controlados los parámetros del agua del sistema. Para ello, cabe destacar que, producto de las características propias del sistema, las necesidades de las plantas y, el comportamiento de los parámetros del agua; el control se diseñó para ejecutarse de manera secuencial, de modo que las variables del sistema se corrijen en el siguiente orden: nivel de agua en el tanque, temperatura del agua, nivel de conductividad eléctrica y, pH.

Es necesario que el orden se cumpla para prevenir que se ejecuten acciones de control cuando el tanque presente un nivel de agua menor al necesario, evitar que la temperatura del agua afecte las mediciones de pH o conductividad eléctrica y, reducir las acciones de control requeridas para alcanzar los valores óptimos de los parámetros.

Además de lo anterior, se añaden dos consideraciones finales. Primeramente, las acciones de control para la corrección de la temperatura, conductividad eléctrica y pH, se realizan únicamente cuando la bomba de circulación se encuentra activa, para así propiciar la homogeneización de los parámetros físicos y químicos del agua.

Como segundo punto, la dosificación de soluciones nutritivas A y B, encargadas de aportar los nutrientes requeridos por las plantas, se realiza con una proporción de 4:1 respectivamente, en base al nivel de conductividad eléctrica del agua. Si bien la proporción original es de 5:1, debido al tiempo de levantamiento de la señal de activación, así como el tiempo de retardo en la salida de líquido de la bomba, se define esta nueva relación (de manera preventiva). En caso de variar la composición de las sustancias o, emplear bombas diferentes a las propuestas, los valores pueden ser ajustados en caso de ser necesario.

```

240 /*
241 * Water parameters control
242 * Control the tank level, temperature, electrical conductivity
243 * and pH. The algorithm follows the described order in and does
244 * not modify the next variable until the previous one is at the
245 * correct value
```

```
246 */  
247 void parametersControl() {  
248  
249     // Level control  
250     if( (409 < Lvalue) && (Lvalue < 613) ) digitalWrite(pinLpump ,  
251         HIGH);  
252  
253     if( Lvalue > 818 ) digitalWrite(pinLpump , LOW);  
254  
255     // Temperature control  
256     if( (Tvalue < Tmin) && (Lvalue < 50) && cPumpON )  
257         digitalWrite(pinHeater , HIGH);  
258  
259     if( (Tvalue >= Tmin) || !cPumpON ) digitalWrite(pinHeater , LOW);  
260  
261     // EC control  
262     if( (ECvalue < ECmin) && (Tvalue >= Tmin) && (Lvalue < 50) &&  
263         cPumpON && (start == 0) ) {  
264  
264         digitalWrite(pinApump , HIGH);  
265         digitalWrite(pinBpump , HIGH);  
266  
267         start = millis();  
268     }  
269  
270     unsigned long diff = abs(millis() - start);  
271  
272     if( diff > tB*1000 ) digitalWrite(pinBpump , LOW);  
273  
274     if( diff > tA*1000 ) {  
275  
276         digitalWrite(pinApump , LOW);  
277         start = 0;  
278     }  
279  
280     // PH control  
281     if( (PHvalue > PHmax) && (ECvalue >= ECmin) && (Tvalue >= Tmin)  
282         && (Lvalue < 50) && cPumpON )  
283         digitalWrite(pinUpump , HIGH);  
283
```

```

284 if( ( PHvalue <= PHmax) || !cPumpON )
285     digitalWrite(pinUpump, LOW);
286 }

```

Para concluir con el código implementado, se detallan a continuación, las funciones “setup” y “loop”, propias de la plataforma Arduino. Estas funciones son estándar y su funcionamiento se describe en la documentación de Arduino mostrada en [1], sin embargo, se retoma la idea principal de cada una de ellas. En estas funciones se hace uso de todas las funciones previamente desarrolladas, además de algunas adicionales pertenecientes a las librerías incluidas en el proyecto.

La función “setup” se ejecuta una única vez al inicio de la operación del Arduino y, para el caso actual, en ella se realizan varias funcionalidades. Primeramente, se declara la ubicación del módulo de tarjeta SD y se inicializan los sensores de pH y conductividad eléctrica, así como la pantalla LCD 16x2 I2C y la propia tarjeta SD. Posteriormente, se inicializa el reloj en tiempo real en conjunto con la verificación de su correcto funcionamiento y, se añade la línea de código necesaria para su sincronización.

Finalmente, se definen los pines digitales que serán empleados como salidas. Esta acción es de importancia, ya que los pines digitales del Arduino UNO (basado en el Atmega) están configurados de manera predeterminada como entradas, por lo cual presentan una alta impedancia de entrada, misma que representa un inconveniente al entregar corriente a las cargas conectadas en ellos; aun si las mismas son de muy bajo consumo, como es el caso de los relés de estado sólido empleados.

```

288 /*
289 * "Set up" function
290 * It runs at the beginning and only once, when the Arduino is
291 * powered
292 */
293 void setup() {
294
295     // Declaration of the SD module location
296     SD.begin(pinSD);
297
298     // Initialization of the pH and EC sensors
299     pH.begin();
300     EC.begin();
301
302     // Initialization of the screen and the SD card
303     initScreen();
304     initSDcard();
305
306     // Real time clock initialization and verification
307     while ( !rtc.begin() ){
308
309         screen.home();
310         screen.print(F(" COLOQUE EL RTC"));

```

```

311     screen.setCursor(0, 1);
312     screen.print(F("DS3231 Y REANUDE"));
313 }
314
315 /* Real time clock synchronization
316 * To synchronize the real time clock, uncomment the next line
317 * and upload the code. After synchronized, comment back the
318 * line and upload the code again
319 */
320 //rtc.adjust( DateTime( F(__DATE__), F(__TIME__) ) );
321
322 // Definition of the output digital pins
323 pinMode(pinLight, OUTPUT);
324 pinMode(pinHeater, OUTPUT);
325 pinMode(pinCpump, OUTPUT);
326 pinMode(pinUpump, OUTPUT);
327 pinMode(pinLpump, OUTPUT);
328 pinMode(pinBpump, OUTPUT);
329 pinMode(pinApump, OUTPUT);
330
331 }
```

Finalmente, se desarrolló la función “loop”. En esta se ejecutan todas las instrucciones para la lectura de las variables controladas, además de las funciones de despliegue y escritura de datos y, los algoritmos de control. En esta sección se ejecuta de manera recurrente, mientras el Arduino se encuentre activo, por lo cual, la primera instrucción que se ejecuta en cada ciclo es la lectura de la fecha y la hora actuales, la cual es seguida por la ejecución de los algoritmos que no dependen de los parámetros del sistema.

Luego de esto, se leen los parámetros fisicoquímicos del agua, haciendo uso de lecturas analógicas y de las funciones propias de las librerías de los sensores. De estas instrucciones, es necesario destacar que los valores entregados por los sensores de pH y conductividad eléctrica deben ser convertidos a milivolts (mV), para que puedan ser procesados de manera correcta por las funciones respectivas. Una vez se leen y procesan los valores, se ejecuta el algoritmo para la corrección de los mismos.

Por último, se ejecutan las funciones para despliegue y escritura de datos, mismas que se deben ejecutar de manera periódica, en base a los tiempos de actualización (en minutos) definidos en las variables del preámbulo. Para lograrlo, se emplea una variable auxiliar, en conjunto con la función “millis” propia del Arduino, de manera que se puede conocer el momento (en milisegundos) en el cual se realizó la acción respectiva y así, emplear este valor de tiempo para calcular en qué momento se debe ejecutar nuevamente la función, logrando que se ejecute una única vez en cada periodo definido.

```

333 /*
334 * "Loop" function
335 * It runs repeatedly while the Arduino is powered
336 */
```

```

337 void loop() {
338
339     rightNow = rtc.now();      // Current date and hour
340
341     lights();
342
343     circulationPump();
344
345     Lvalue = analogRead(pinLevel);    // Level sensor value
346
347     Tvalue = DS.getTempC();          // Temperature sensor value
348
349     // EC voltage value
350     float ECv = float(analogRead(pinEC))/1024.0 * 5000;
351     // Converted EC value
352     ECvalue = EC.readEC(ECv, Tvalue);
353     // PH voltage value
354     float pHv = float(analogRead(pinPH))/1024.0 * 5000;
355     // Converted pH value
356     PHvalue = pH.readPH(pHv, Tvalue);
357
358     parametersControl();
359
360     // Condition for writing to SD card
361     unsigned long wAux = abs(millis() - writeAux);
362
363     if( wAux > writeData*60000 ) {
364
365         writeSD();
366         writeAux = millis();
367     }
368
369     // Condition for screen displaying
370     unsigned long dAux = abs(millis() - displayAux);
371
372     if( dAux > displayData*60000 ) {
373
374         displayOnScreen();
375         displayAux = millis();
376     }
377
378 }
```

Capítulo 5

EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL DISEÑO

Con el objetivo de comprobar el funcionamiento del sistema diseñado, se desarrolló una infraestructura de pruebas, con la cual verificar el desempeño de las diferentes secciones del código. Para lograr este cometido, fue necesario implementar algunos circuitos que emulan los valores de tensión entregados por los sensores de pH, conductividad eléctrica y nivel, contemplados en el diseño. Además de representar las entradas, también se realizó la medición de la tensión en los pines de salida del Arduino, los cuales se encargan de activar los relés de los actuadores.

Dado la naturaleza y el funcionamiento del sistema, las pruebas realizadas se basan en la observación de los cambios en las variables representadas (pH, conductividad eléctrica y nivel) y la reacción del sistema de control ante estas variaciones. Para comprobar la realización de las pruebas experimentales, se grabó un video con la demostración del funcionamiento, el cual puede ser accedido y observado por medio del siguiente enlace: <https://youtu.be/yj9eerF7I1A>.

Finalmente, para lograr que se mostraran todas las funciones del sistema, garantizando que la extensión del video fuese adecuada, se realizaron algunos cambios al código, los cuales permiten que los intervalos de actividad sean menores, sin comprometer el funcionamiento general del sistema. Tanto los circuitos de prueba, como los cambios al código y los resultados obtenidos, se detallan en las secciones posteriores del capítulo.

5.1. Circuitos de prueba

Para el caso específico del sensor de temperatura, no se logró implementar un mecanismo de prueba debido a que dicho sensor entrega una señal digital con una frecuencia aproximada de 7000 Hz (según los datos de la hoja del fabricante), lo cual dificulta la implementación de esta señal eléctrica de manera artificial, sin el uso de microcontroladores, circuitos integrados u otros componentes complejos. Para evitar que los problemas con la lectura de temperatura afecten la operación de las funcionalidades restantes, se fijó un valor constante en el código y se omitió esta lectura en la función “loop” del Arduino.

Los circuitos implementados para representar el comportamiento de los sensores se observan en la figura 5.1. El objetivo fue obtener valores de tensión entre 1,07 V y 1,71 V, para el caso de la medición

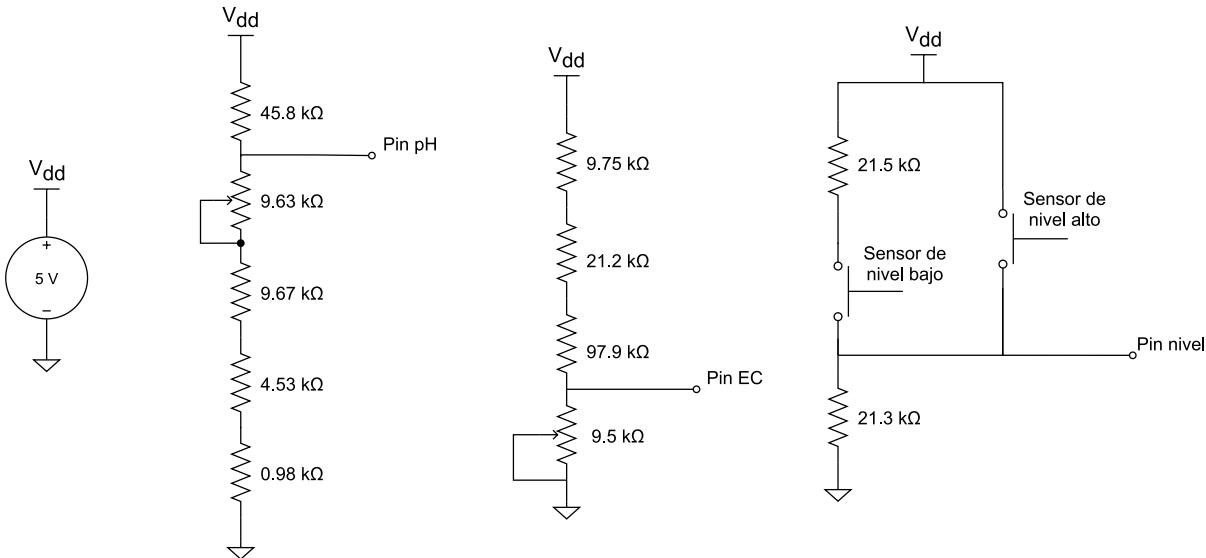


Figura 5.1: Diagramas de los circuitos utilizados para emular el comportamiento de los sensores de pH, conductividad eléctrica y nivel [Elaboración propia].

de pH, así como valores entre 0 V y 0,34 V para la medición de conductividad eléctrica, de manera que se obtengan valores aproximados entre los 5 y 8 de pH y, entre 0 y 2 mS/cm de conductividad eléctrica. Estos circuitos son alimentados por la terminal de 5 V el Arduino y su referencia es la terminal de tierra (GND) del mismo. En los diagramas, la alimentación mencionada se representa por medio de la fuente de corriente continua de 5V empleada.

Para el caso del sensor de pH, se implementó un divisor de tensión con resistores de $47\text{ k}\Omega$, $10\text{ k}\Omega$, $4,7\text{ k}\Omega$ y $1\text{ k}\Omega$, además de un potenciómetro de $10\text{ k}\Omega$. De manera similar, para el caso del sensor de conductividad eléctrica, se implementó un divisor de tensión con resistores de $10\text{ k}\Omega$, $22\text{ k}\Omega$ y $100\text{ k}\Omega$, además de un potenciómetro de $10\text{ k}\Omega$. Finalmente, para el circuito del sensor de nivel, se implementó el esquemático mostrado en la sección de diseño, con la diferencia de que se emplearon dos pulsadores para representar los interruptores de boya flotante que conforman el circuito real.

En la figura 5.1 se observan los circuitos con los valores reales de los resistores y los puntos de medición (respecto a la terminal de tierra), del valor de tensión buscado en cada caso. Además, en la figura 5.2 se observa una imagen de la implementación real de estos circuitos, en los cuales se distinguen con cable rojo las terminales de 5 V, con negro las terminales de tierra y con blanco, las terminales de medición.

5.2. Cambios en el código

El primer cambio realizado en el código del sistema tiene como finalidad evitar que se efectúe la lectura de temperatura, de manera que las funciones de control operen adecuadamente. Por esta razón, en el tramo de código mostrado, se observa comentada la instrucción de la línea 15. Además de este cambio,

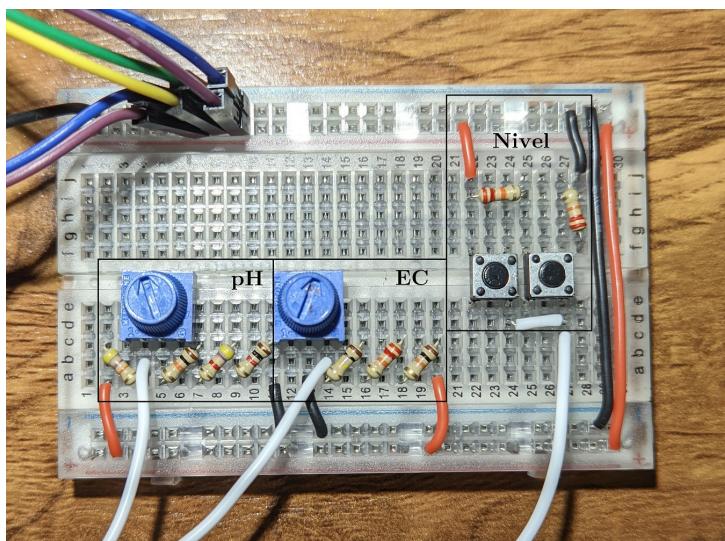


Figura 5.2: Circuitos implementados para emular el comportamiento de los sensores de pH, conductividad eléctrica y nivel [Elaboración propia].

en esta sección también se modificó los argumentos de las funciones “if” de las líneas 31 y 41, en las cuales se redefinió el factor que multiplica las variables de tiempo, de 60 000 a 1000. El cambio permite que los tiempos de actualización para la pantalla LCD 16x2 y, el intervalo de escritura en la tarjeta SD, se comporten como tiempos en segundos y no en minutos, como originalmente se definió.

Seguidamente, se observa la función “loop” con las modificaciones descritas:

```

1 /*
2  * "Loop" function
3  * It runs repeatedly while the Arduino is powered
4 */
5 void loop() {
6
7     rightNow = rtc.now();      // Current date and hour
8
9     lights();
10
11    circulationPump();
12
13    Lvalue = analogRead(pinLevel);      // Level sensor value
14
15    // Tvalue = DS.getTempC();           // Tempertature sensor value
16
17    // EC voltage value

```

```

18 float ECv = float(analogRead(pinEC))/1024.0 * 5000;
19 // Converted EC value
20 ECvalue = EC.readEC(ECv, Tvalue);
21 // PH voltage value
22 float pHv = float(analogRead(pinPH))/1024.0 * 5000;
23 // Converted pH value
24 PHvalue = pH.readPH(pHv, Tvalue);
25
26 parametersControl();
27
28 // Condition for writing to SD card
29 unsigned long wAux = abs(millis() - writeAux);
30
31 if( wAux > writeData*1000 ) {
32
33     writeSD();
34     writeAux = millis();
35
36 }
37
38 // Condition for screen displaying
39 unsigned long dAux = abs(millis() - displayAux);
40
41 if( dAux > displayData*1000 ) {
42
43     displayOnScreen();
44     displayAux = millis();
45 }
46
47 }

```

La segunda modificación al código se encuentra en la función para el control de la iluminación del sistema. En esa sección, se cambió la instrucción “rightNow.hour()” por “rightNow.second()”, en los argumentos de las funciones “if” mostradas en las líneas 9 y 15. Con esta variación se logra que el encendido de las luces ocurra en el segundo 8 y el apagado, 12 segundos después, cuando se alcanza el segundo 20, mostrándose así el comportamiento del algoritmo en un tiempo adecuadamente corto.

La función correspondiente con los cambios efectuados, se observa seguidamente:

```

1 /*
2  * System lights control
3  * Turns the system lights on, if they are off and it is about the
4  * activation hour. It also turns the system lights off, if they
5  * are on and it is about the deactivation hour

```

```

6  /*
7 void lights() {
8
9   if( (rightNow.second() > dawn) && !lightsON ) {
10
11     digitalWrite(pinLight , HIGH);
12     lightsON = true;
13   }
14
15   if( (rightNow.second() > nightfall) && lightsON ) {
16
17     digitalWrite(pinLight , LOW);
18     lightsON = false;
19   }
20
21 }
```

Finalmente, el último cambio realizado en el código tiene como objetivo acelerar el periodo de operación de la bomba de circulación encargada del riego de los niveles del sistema. Para esto, se cambió la instrucción “rightNow.minute()” por “rightNow.second()” de las funciones “if” mostradas en las líneas 9 y 16 del segmento del programa mostrado, con lo cual, el ciclo de operación de la bomba se reduce de 15 minutos a 15 segundos, logrando que el comportamiento se observe en un tiempo corto, compatible con los cambios anteriores y adecuado para su demostración.

A continuación, se observa la función con los cambios efectuados:

```

1 /*
2  * Circulation pump control
3  * The circulation pump turns on at the even multiples of the time
4  * constant and turns off at its odd multiples. It is designed for
5  * 10, 15 or 30 minute intervals
6  */
7 void circulationPump() {
8
9   if( (rightNow.second() == 0) || (rightNow.second() == 2*period)
10    || (rightNow.second() == 4*period) ) {
11
12     digitalWrite(pinCpump , HIGH);
13
14     cPumpON = true;
15   }
16
17   if( (rightNow.second() == period) || (rightNow.second() ==
18    3*period) || (rightNow.second() == 5*period) ) {
```

```

17
18     digitalWrite(pinCpump, LOW);
19
20     cPumpON = false;
21 }
22
23 }
```

5.3. Resultados obtenidos

Para mostrar el funcionamiento del sistema, además de la demostración realizada en el video anexado previamente, se graficó los datos recolectados durante las pruebas experimentales realizadas por medio de la infraestructura implementada, para representar los sensores de pH, conductividad eléctrica y nivel. Los datos de los sensores se tomaron de las escrituras realizadas en la tarjeta SD, mediante el algoritmo diseñado para este fin. En adición a estos datos, se realizaron las mediciones temporizadas de las salidas del Arduino, en los pines correspondientes a la bomba de circulación (B. Circ), la bomba de urea (B. Urea) y la bomba de sustancia nutritiva A (B. Sust. A); medidas que posteriormente fueron sincronizadas con los datos de la tarjeta SD.

En la figura 5.3 se observan dos imágenes de ejemplo de las mediciones realizadas durante las pruebas experimentales del sistema. En la figura 5.4 se observan gráfico de las lecturas de pH y, las lecturas realizadas en el pin correspondiente a la bomba de urea (B. Urea), las cuales están ligadas directamente. Finalmente, en la figura 5.5 se observan gráfico de las lecturas de conductividad eléctrica, además de las lecturas realizadas en el pin correspondiente a la bomba de sustancia nutritiva A (B. Sust. A), las cuales también están ligadas directamente.

Los datos fueron graficados en función del tiempo, el cual se mide en segundos, a partir del minuto 30 de las 18 horas, de forma que se tiene un valor absoluto a partir de la referencia. Las tablas con los valores completos se observan en el anexo del apéndice B.1

5.3.1. Discusión

Con base en el algoritmo implementado para el control de los parámetros el agua del sistema, se espera que el pH se mantenga menor al valor máximo definido (pH = 6,5 en este caso) mediante el ingreso de urea, sustancia que presenta un pH ácido, lo cual contribuye a reducir el valor general de la sustancia a la cual se aplica. Esta sustancia únicamente se aplica cuando se da la condición anterior y, la bomba de circulación del agua se mantiene activa, se manera que se propicia la mezcla de las partes y la homogeneización del pH general.

Como se observa en el gráfico 5.4, cuando el valor de pH se ubica sobre el valor máximo de 6,5 de pH, la bomba de urea se activa para compensar este valor. A su vez, cuando el tiempo de medición concuerda con el periodo en el cual la bomba de circulación no está activa, la dosificación de urea se detiene hasta que esta regrese a su estado activo.

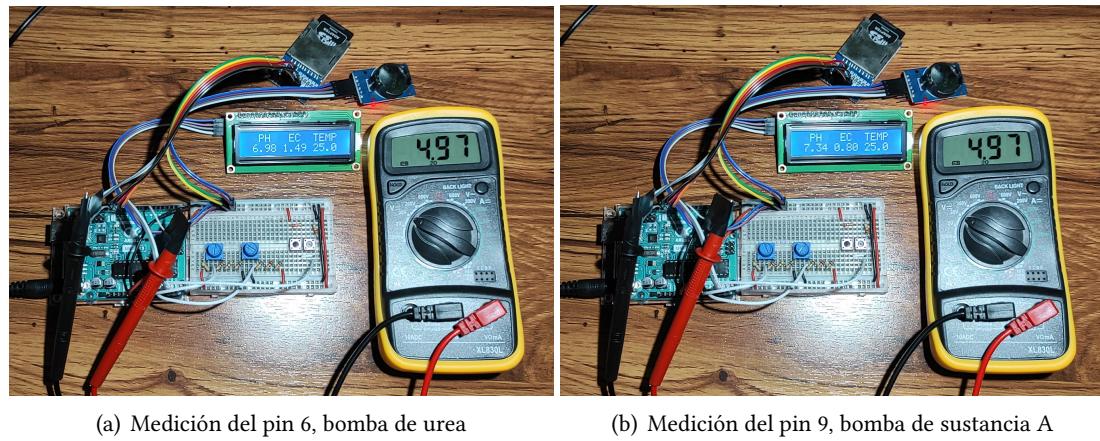


Figura 5.3: Ejemplos de mediciones realizadas durante las pruebas experimentales.

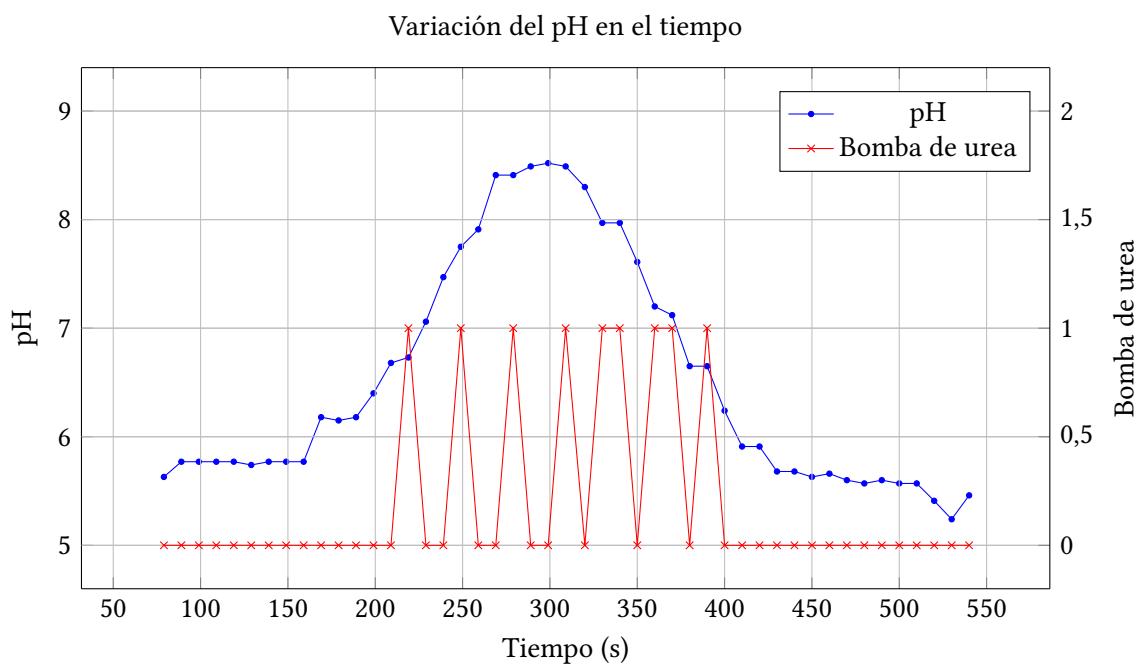


Figura 5.4: Gráfico de pH y activación de la bomba de urea, en función del tiempo.

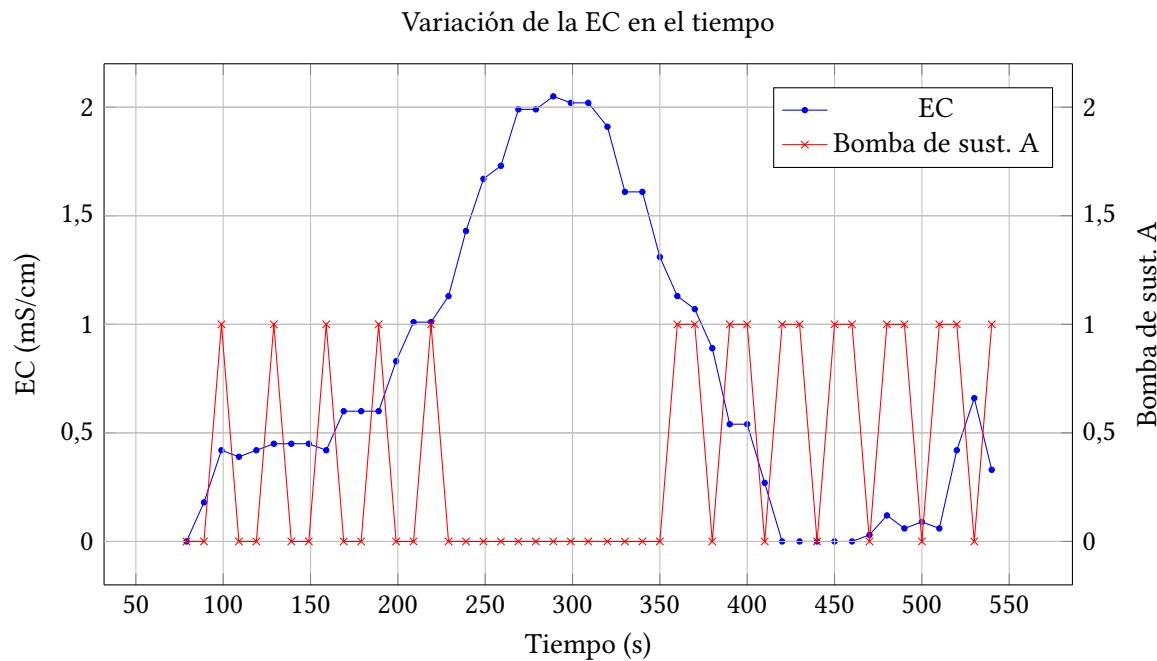


Figura 5.5: Gráfico de conductividad eléctrica (EC) y activación de la bomba de sustancia A, en función del tiempo.

Cabe resaltar que, producto de que las mediciones se realizaron en intervalos de 10 s, la gráfica de activación de la bomba de urea se observa con picos y líneas diagonales. Si por el contrario, las lecturas se realizan en intervalos más cortos o, de manera continua, el resultado sería una onda cuadrada, en la cual el periodo en bajo será igual al periodo en alto de la bomba de circulación. De igual forma, su periodo en alto se extenderá como máximo, durante el periodo en alto de la bomba anterior, siempre que el pH propicie su funcionamiento.

De manera análoga a la corrección del pH del agua, el control de conductividad eléctrica se da cuando el valor medido es menor al mínimo indicado (1,3 mS/cm). Como es de conocimiento, el valor de conductividad eléctrica está directamente ligado a los nutrientes disponibles en el agua, por lo cual, cuando este valor está por debajo del mínimo, representa que se requieren ingresar más nutrientes al agua, lo cual a su vez representa un aumento del nivel en el valor observado.

Para corregir el valor de conductividad eléctrica del agua, se emplean dos sustancias nutritivas (denotadas como A y B), las cuales se ingresan activando las bombas correspondientes. Como se especificó en la sección teórica, la bomba de sustancia A se debe activar en intervalos de 8 s, a su vez que la bomba B en intervalos de 2 s, de manera que se obtenga la proporción indicada de nutrientes en el agua.

En el gráfico 5.5 se puede observar el valor de conductividad eléctrica del agua, así como la activación de la bomba de sustancia A, la cual presenta el comportamiento esperado con base en los postulados expuestos. Se observa que la bomba de sustancia A se activa cuando el nivel de conductividad eléctrica es inferior al límite de 1,3 mS/cm planteado y, al igual que para las acciones de control de temperatura

y pH, la bomba en cuestión únicamente se activa cuando la bomba de circulación del agua permanece activa.

Al igual que para el caso del gráfico 5.4, la onda de activación de la bomba de sustancia A presenta picos y segmentos diagonales, debido al periodo de muestreo de los valores. Si bien no se realizó la medición de la bomba B, durante la prueba en la cual se recolectaron los datos empleados para los gráficos anteriores, en el video adjunto se puede observar el comportamiento de la misma durante sus periodos de 2 s, tal y como se esperaba en base algoritmo.

Respecto al comportamiento de la bomba de circulación, su efecto se observa sobre las acciones de control en la corrección del pH y la conductividad eléctrica. En adición a esto, por medio del video se puede observar su operación en los intervalos de 15 s esperados, en base a la configuración planteada en el código. En la tabla de datos también se puede observar que entre los 0 s y 15 s y, entre los 30 s y 45 s; la bomba de circulación se mantuvo activa, con lo cual se comprueban los efectos anteriormente observados.

El comportamiento esperado del circuito de relleno para la compensación del volumen total del tanque, también se explica en las secciones anteriores y consiste en activar la bomba de relleno cuando el interruptor bajo se cierra y, desactivarla cuando el sensor alto se cierre. Si bien en los datos recolectados no se realizó la medición en el pin correspondiente a este componente, en el video se logró observar su adecuado funcionamiento y, en adición a esto, se realizó la escritura de una interpretación del nivel en función de los interruptores activados. En la tabla de datos anexada en el apéndice B.1 observa dicha interpretación.

Finalmente, se observó el comportamiento de las luces, el cual consiste en que las mismas sean encendidas en el segundo 8 y apagadas en el segundo 20, de cada minuto que el Arduino permanece activo. Este comportamiento se puede observar demostrado en el video, mediante el cual se realizó la medición posterior del intervalo temporal entre el encendido y el apagado y, se comprobó que tuvo una extensión de 12 s, representando así las 12 horas de iluminación requerida.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En la presente sección se detallan las principales conclusiones obtenidas a partir del diseño y las pruebas experimentales del conjunto para la automatización del sistema hidropónico para producción en interiores trabajado. Asimismo, se añaden algunas recomendaciones para continuar con la implementación final sobre el sistema real.

6.1. Conclusiones

- Durante el proyecto, se logró desarrollar un sistema de monitoreo y control de las principales variables fisicoquímicas del agua, aplicable en sistemas hidropónicos de agua recirculante, específicamente a la infraestructura del sistema hidropónico para la producción en interiores de cultivos de hoja, mediante la técnica NFT; perteneciente al Laboratorio de Fabricación Digital (FabLab) del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- En torno al sistema de medición diseñado, se concluye que este tiene la capacidad de medir las variables de pH, conductividad eléctrica, temperatura y nivel de agua en el tanque de almacenamiento, mediante el uso de sensores de fácil acceso y bajo costo. Se resalta su fiabilidad, gracias a que el conjunto se conforma de sensores con una adecuada precisión en la entrega de las mediciones, siempre que se ejecute el correcto mantenimiento de los componentes para reducir la probabilidad de errores.
- Con el desarrollo del sistema de actuación, se concluye su capacidad para aumentar el nivel de conductividad eléctrica, aumentar la temperatura, reducir el pH y mantener un volumen adecuado, del agua en el tanque de almacenamiento del sistema hidropónico. Además de estas características, el sistema implementado tiene la capacidad de producir la circulación del agua por los niveles del sistema y controlar el horario de iluminación en estos.
- Para la operación conjunta de los sensores y actuadores empleados, se desarrolló un algoritmo de control sobre la plataforma Arduino, en el cual se utilizó la técnica de control “ON/OFF”, permitiendo que las variables controladas se mantengan por encima o por debajo de un punto definido. Con la operación de este algoritmo, se concluye que el sistema completo tiene la capacidad de

mantener los parámetros del agua en su valor idóneo, mediante la corrección unidireccional de las variables controladas.

- A pesar de las limitaciones que presenta la técnica de control empleada, gracias a la alta velocidad de sensado del sistema de control (50 ms en promedio), respecto a los cambios en las variables (algunos minutos), además de la capacidad de las plantas para soportar variaciones temporales en los parámetros del medio; se puede concluir que el mecanismo de control implementado cumple con los requerimientos para mantener los parámetros del agua estables, de manera que los cultivos producidos se benefician de las características garantizadas y se minimiza la intervención humana durante el proceso de crecimiento.
- Finalmente, mediante las pruebas experimentales realizadas empleando los circuitos que simulan el comportamiento de los sensores, se concluye que el sistema tiene un desempeño óptimo en la lectura de las entradas y en la manipulación de las salidas, con base en los valores mínimos o máximos definidos para los parámetros controlados. En adición a esto, se comprobó el correcto despliegue de los valores en pantalla, así como la adecuada escritura de los mismos en la tarjeta SD añadida.

6.2. Recomendaciones y trabajo a futuro

- Para continuar con la implementación final de los sistemas diseñados y evaluados, primeramente, se recomienda la adquisición de los sensores y actuadores necesarios para la construcción de la infraestructura. Con estos componentes, se deben realizar pruebas de funcionamiento para descartar comportamientos inesperados y, considerar posibles desviaciones para su futura calibración.
- Una vez evaluados los componentes a utilizar, se recomienda continuar con la construcción de los sistemas finales de sensado y actuación y, su acople en el tanque de almacenamiento de agua. Una vez instalado el conjunto, se debe iniciar el funcionamiento durante un periodo de prueba, para verificar que los diferentes componentes operen de la forma esperada y, en caso de ser necesario, se deberán realizar ajustes en los valores deseados de las diferentes variables controladas.
- Una vez finalizado el periodo de prueba, se puede continuar con el plantado de los cultivos deseados y la puesta en marcha del sistema de control. Dada la posibilidad de que se presenten variaciones no esperadas, debido a la calidad de las plantas, su estado de salud u otros agentes externos, se deberán realizar monitoreos iniciales sobre el sistema, para realizar los ajustes necesarios y descartar problemas en el control de los parámetros.
- Finalmente, como alternativa a la estructura empleada para el desarrollo del código, se puede desarrollar una estructura lógica con operación en tiempo real. Mediante el uso de librerías de Arduino, como FreeRTOS, se pueden crear tareas en las cuales implementar las funcionalidades desarrolladas, mismas que son ejecutadas siguiendo un patrón de prioridades predecible y, de esta manera se obtiene la simulación de una ejecución multitarea (al cambiar rápidamente entre las diferentes tareas), en plataformas que originalmente no lo soportan.

Apéndice A

HOJAS DE FABRICANTE DISPONIBLES DE LOS COMPONENTES EMPLEADOS

A.1. Hoja del fabricante del sensor digital de temperatura DS18B20

Se anexan las páginas 1, 5, 24 y 25 de la hoja de fabricante del sensor digital de temperatura DS18B20, propiedad de Dallas Semiconductor, las cuales fueron empleadas para la obtención de las características y parámetros de relevancia del sensor de temperatura.



www.dalsemi.com

PRELIMINARY

DS18B20
Programmable Resolution
1-Wire® Digital Thermometer
FEATURES

- Unique 1-Wire interface requires only one port pin for communication
- Multidrop capability simplifies distributed temperature sensing applications
- Requires no external components
- Can be powered from data line. Power supply range is 3.0V to 5.5V
- Zero standby power required
- Measures temperatures from -55°C to +125°C. Fahrenheit equivalent is -67°F to +257°F
- ±0.5°C accuracy from -10°C to +85°C
- Thermometer resolution is programmable from 9 to 12 bits
- Converts 12-bit temperature to digital word in 750 ms (max.)
- User-definable, nonvolatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Applications include thermostatic controls, industrial systems, consumer products, thermometers, or any thermally sensitive system

DESCRIPTION

The DS18B20 Digital Thermometer provides 9 to 12-bit (configurable) temperature readings which indicate the temperature of the device.

Information is sent to/from the DS18B20 over a 1-Wire interface, so that only one wire (and ground) needs to be connected from a central microprocessor to a DS18B20. Power for reading, writing, and performing temperature conversions can be derived from the data line itself with no need for an external power source.

Because each DS18B20 contains a unique silicon serial number, multiple DS18B20s can exist on the same 1-Wire bus. This allows for placing temperature sensors in many different places. Applications where this feature is useful include HVAC environmental controls, sensing temperatures inside buildings, equipment or machinery, and process monitoring and control.

1 of 27

050400

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Voltage on Any Pin Relative to Ground	-0.5V to +6.0V
Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-55°C to +125°C
Soldering Temperature	See J-STD-020A specification

* This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

RECOMMENDED DC OPERATING CONDITIONS

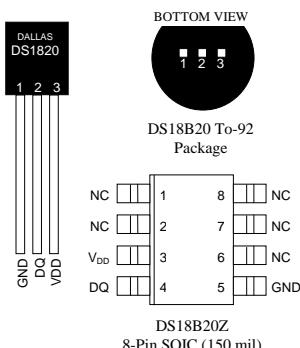
PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Supply Voltage	V _{DD}	Local Power	3.0	5.5	V	1	
Data Pin	DQ		-0.3	+5.5	V	1	
Logic 1	V _{IH}		2.2	V _{CC} + 0.3	V	1,2	
Logic 0	V _{IL}		-0.3	+0.8	V	1,3,7	

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Thermometer Error	t _{ERR}	-10°C to +85°C		±½	°C		
		-55°C to +125°C		±2			
Input Logic High	V _{IH}	Local Power	2.2	5.5	V	1,2	
		Parasite Power	3.0		V	1,2	
Input Logic Low	V _{IL}		-0.3	+0.8	V	1,3,7	
Sink Current	I _L	V _{I0} =0.4V	-4.0		mA	1	
Standby Current	I _{DSS}			750	1000	nA	6.8
Active Current	I _{DD}			1	1.5	mA	4
DQ-Input Load Current	I _{DQ}			5		μA	5

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS: NV MEMORY(-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
NV Write Cycle Time	t _{wr}			2	10	ms	
EPPROM Writes	N _{EEWR}	-55°C to +55°C	50k				writes
EPPROM Data Retention	t _{EEDR}	-55°C to +55°C	10			years	

PIN ASSIGNMENT**PIN DESCRIPTION**

GND - Ground
DQ - Data In/Out
V_{DD} - Power Supply Voltage
NC - No Connect

OPERATION - MEASURING TEMPERATURE

The core functionality of the DS18B20 is its direct-to-digital temperature sensor. The resolution of the DS18B20 is configurable (9, 10, 11, or 12 bits), with 12-bit readings the factory default state. This equates to a temperature resolution of 0.5°C, 0.25°C, 0.125°C, or 0.0625°C. Following the issuance of the Convert T [44h] command, a temperature conversion is performed and the thermal data is stored in the scratchpad memory in a 16-bit, sign-extended two's complement format. The temperature information can be retrieved over the 1-Wire interface by issuing a Read Scratchpad [BEh] command once the conversion has been performed. The data is transferred over the 1-Wire bus, LSB first. The MSB of the temperature register contains the "sign" (S) bit, denoting whether the temperature is positive or negative.

Table 2 describes the exact relationship of output data to measured temperature. The table assumes 12-bit resolution. If the DS18B20 is configured for a lower resolution, insignificant bits will contain zeros. For Fahrenheit usage, a lookup table or conversion routine must be used.

Temperature/Data Relationships Table 2

2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	2 ⁻¹	2 ⁻²	2 ⁻³	2 ⁻⁴	LSB
MSB (unit = °C)								LSb
S	S	S	S	S	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	MSB

TEMPERATURE	DIGITAL OUTPUT (Binary)	DIGITAL OUTPUT (Hex)
+125°C	0000 0111 1101 0000	07D0h
+85°C	0000 0101 0101 0000	0550h*
+25.0625°C	0000 0001 1001 0001	0191h
+10.125°C	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0.5°C	0000 0000 0000 1000	0008h
0°C	0000 0000 0000 0000	0000h
-0.5°C	1111 1111 1111 1000	FFF8h
-10.125°C	1111 1111 0101 1110	FF5Eh
-25.0625°C	1111 1110 0110 1111	FF6Fh
-55°C	1111 1100 1001 0000	FC90h

*The power on reset register value is +85°C.

OPERATION - ALARM SIGNALING

After the DS18B20 has performed a temperature conversion, the temperature value is compared to the trigger values stored in TH and TL. Since these registers are 8-bit only, bits 9-12 are ignored for comparison. The most significant bit of TH or TL directly corresponds to the sign bit of the 16-bit temperature register. If the result of a temperature measurement is higher than TH or lower than TL, an alarm flag inside the device is set. This flag is updated with every temperature measurement. As long as the alarm flag is set, the DS18B20 will respond to the alarm search command. This allows many DS18B20s to be connected in parallel doing simultaneous temperature measurements. If somewhere the temperature exceeds the limits, the alarming device(s) can be identified and read immediately without having to read non-alarming devices.

5 of 27

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS: (-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Temperature Conversion Time	t _{CONV}	9 bit			93.75	ms	
		10 bit			187.5		
		11 bit			375		
		12 bit			750		
Time Slot	t _{SLOT}		60		120	μs	
Recovery Time	t _{REC}		1			μs	
Write 0 Low Time	t _{LOW0}		60		120	μs	
Write 1 Low Time	t _{LOW1}		1		15	μs	
Read Data Valid	t _{RDV}				15	μs	
Reset Time High	t _{RSTH}		480			μs	
Reset Time Low	t _{RSTL}		480			μs	9
Presence Detect High	t _{PDHIGH}		15		60	μs	
Presence Detect Low	t _{PDLLOW}		60		240	μs	
Capacitance	C _{IN/OUT}				25	pF	

NOTES:

- All voltages are referenced to ground.
- Logic one voltages are specified at a source current of 1 mA.
- Logic zero voltages are specified at a sink current of 4 mA.
- Active current refers to either temperature conversion or writing to the E² memory. Writing to E² memory consumes approximately 200 μA for up to 10 ms.
- Input load is to ground.
- Standby current specified up to 70°C. Standby current typically is 3 μA at 125°C.
- To always guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V_{ILMAX} may have to be reduced to as much as 0.5V.
- To minimize I_{DSS}, DQ should be: GND ≤ DQ ≤ GND +0.3V or V_{DD} - 0.3V ≤ DQ ≤ V_{DD}.
- Under parasite power, the max t_{RSTL} before a power on reset occurs is 960 μs.

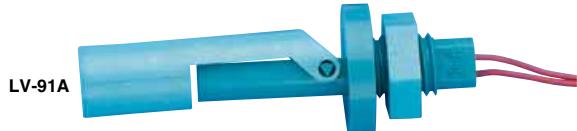
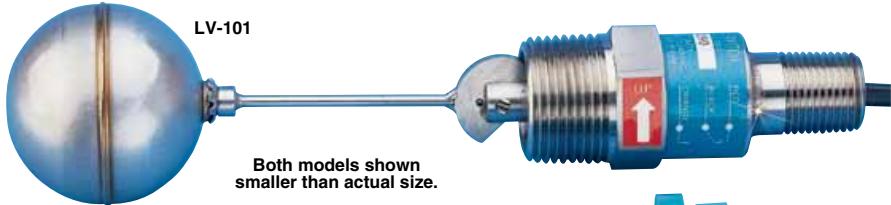
A.2. Hoja del fabricante del interruptor de nivel de líquido, de montaje superficial

Se anexa la hoja de fabricante del interruptor de nivel de líquido, de montaje superficial, propiedad de la compañía Omega, la cual que se utilizó para la obtención de las características y parámetros de utilidad, del dispositivo.

SIDE-MOUNTED LIQUID-LEVEL SWITCHES

For High, Low, or Intermediate Level Sensing

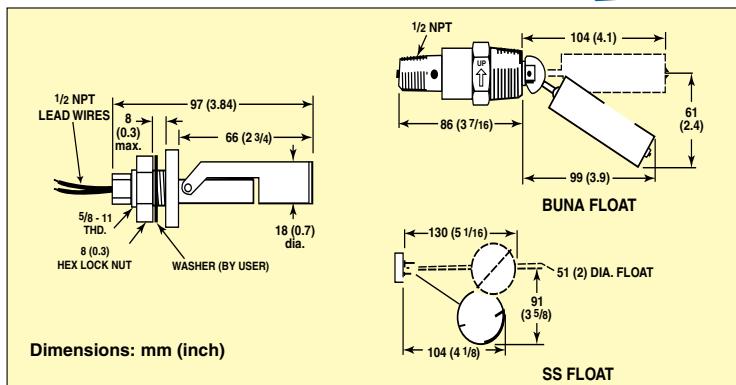
LV-90/100



- ✓ Ideal for Tanks with Inaccessible Tops or Bottoms
- ✓ Low-Cost, Large-Volume OEM Models Available
- ✓ High-Pressure Models Up to 900 psi
- ✓ All-Polysulfone Models Suitable for Food Industry
- ✓ Easy to Install and Maintain

Compact, rugged, and virtually maintenance-free, the LV-90 Series level switch can meet the needs of large-volume OEMs. The sensor is designed for side mounting into tanks that have restricted space or inaccessible tops or bottoms. The all-polysulfone construction makes these switches compatible with a wide range of chemicals and is suitable for food processing applications. Magnetic SPST switch operation is normally open (dry) when units are installed with float downward, or normally closed (dry) when installed with float upward.

The LV-100 Series liquid-level switch requires side mounting into vessels, and is highly reliable. The unit should be installed in environments that are free from excessive contamination and high shock. LV-100 models are available with either Buna or 316 SS float material, both of which have positive float and cam action. These versatile level sensors feature SPDT switches that can be wired as either normally open or normally closed; other models feature SPST switches that are dedicated as either normally open or normally closed. For high-pressure applications, the switches constructed of 316 SS will withstand up to 900 psi. Visit omega.com/level_ref for maximum voltage/current ratings.



SPECIFICATIONS

Other Wetted Material:

304 SS, 316 SS, beryllium, copper, PFA, ceramic for LV-100; 304 SS, PFA, ceramic for LV-101, LV-102, LV-103

Mounting:

1/2 NPT for LV-90; 5/8"-11 thd. and locknut for LV-91; 1 NPT for LV-100 Series

Switch:

SPST; SPDT for models LV-100 and LV-101

Weight:

LV-90 Series: 42.5 g (1.5 oz)

LV-100 Series: 374 g (13.2 oz)

Lead Wires:

LV-90 Series:

22 AWG, 24" polymeric

LV-100 Series:

18 AWG, 24" polymeric

Liquid Specific Gravity:

0.8 minimum for LV-90 Series;
0.8 minimum for LV-100; 0.9 minimum for LV-101, LV-102, LV-103

To Order

Model No.	Switch Rating	Stem/Float	Maximum		Liquid Spec. Gravity
			Temperature	Pressure	
LV-91A	20 VA	Polypropylene	225°F	100 psi	0.8 min
LV-100	20 VA	Brass/Buna	180°F	150 psi	0.8 min
LV-101	20 VA	316 SS	300°F	900 psi	0.9 min
LV-102	100 VA (NO)	316 SS	300°F	900 psi	0.9 min
LV-103	100 VA (NC)	316 SS	300°F	900 psi	0.9 min

Comes complete with operator's manual.

* LV100 Series has CE approval.

** LV-91A is UL rated.

NO = normally open; NC = normally closed.

Ordering Examples: LV-100, side-mounted liquid-level switch with a brass stem and

LV-91A, side mounted liquid level switch with Polypropylene stem and float.

K-XX

A.3. Hoja del fabricante de la bomba difusora de diafragma modelo R385

Se anexa la hoja de fabricante de la bomba difusora de diafragma modelo R385, la cual que se utilizó para la obtención de las características y parámetros de relevancia, del dispositivo. Si bien el fabricante no se da a conocer en el documento adjunto, esta es la información entregada con la compra del dispositivo.

Description:

R385 12V 3M DC Diaphragm Pump Micro Small Tank Aquarium Fish Bar

Mainly used in the aquarium, experimental model, inflatable pool, car washing, watering, timing of mineral water filling etc.

Specifications:

Working voltage: **6-12V DC**
Load operating current: 0.5-0.7A
Maximum flow: 1-3L/Min
Maximum head: 3 m
Maximum suction range: 2 m
Temperature: ≤80°C
Service life: 2500H
Inlet pipe diameter: **6mm**
Size: 86 x 43mm

Package include:

1xMini-aquarium pumping small pumps

Details pictures:



A.4. Hoja del fabricante de la bomba sumergible de circulación de agua, modelo AQUA30W

Se anexa la página 3 del documento de especificaciones de fabricante de la bomba sumergible para circulación de agua, modelo AQUA30W, propiedad de la compañía Evans; la cual que se utilizó para la obtención de las características y parámetros de utilidad, del dispositivo.

FUENTES Y ORNATO

Belleza bajo el agua



- Motores de magnetos permanentes extra eficientes; muy bajo consumo energético, para uso continuo.
- Ideal para la recirculación de agua en fuentes y acuarios.
- Caídas y cortinas de agua.
- Incluye adaptador para manguera.

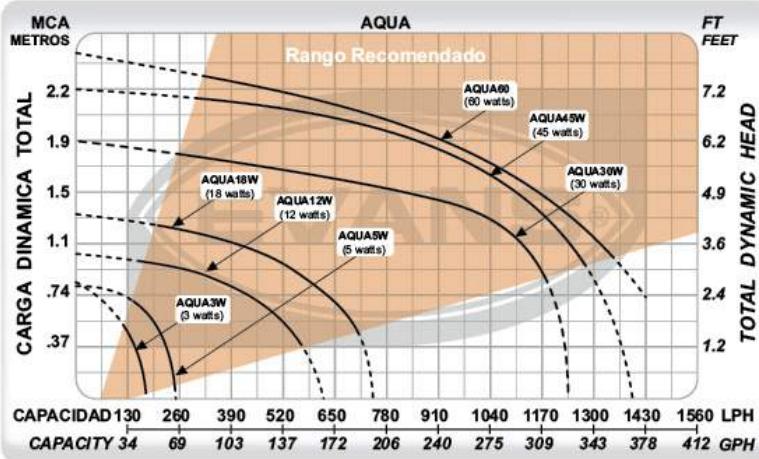


AQUA3W

AQUA18W

AQUA45W

AQUA60W



CÓDIGO	PESO	MEDIDAS LARGO x ANCHO x ALTO
AQUA3W	0.25 kg	7 x 7 x 12 cm
AQUA5W	0.30 kg	11 x 9 x 8 cm
AQUA12W	0.44 kg	12 x 10 x 8 cm
AQUA18W	0.48 kg	12 x 10 x 9 cm
AQUA30W	0.86 kg	13 x 12 x 11 cm
AQUA45W	1.06 kg	16 x 11 x 12 cm
AQUA60W	1.76 kg	19 x 15 x 13 cm

CÓDIGO	Ø DESCARGA	POTENCIA	VOLTAJE	CORRIENTE	FLUJO MÁXIMO	PRESIÓN MÁXIMA	PUNTO DE MAYOR EFICIENCIA
AQUA3W	1/4"	3W	127 V ~ 60Hz 1Φ	5 mA	177 l/h	0.79 m	130 l/h a 0.5 m
AQUA5W	1/4"	5W	127 V ~ 60Hz 1Φ	65 mA	258 l/h	0.76 m	180 l/h a 0.7 m
AQUA12W	1/4"	12W	127 V ~ 60Hz 1Φ	89 mA	612 l/h	1.08 m	450 l/h a 0.75 m
AQUA18W	1/4"	18W	127 V ~ 60Hz 1Φ	178 mA	766 l/h	1.38 m	650 l/h a 0.75 m
AQUA30W	1/2"	30W	127 V ~ 60Hz 1Φ	490 mA	1236 l/h	1.99 m	1000 l/h a 1.3 m
AQUA45W	1/2"	45W	127 V ~ 60Hz 1Φ	680 mA	1422 l/h	2.20 m	1050 l/h a 1.5 m
AQUA60W	3/4"	60W	127 V ~ 60Hz 1Φ	1A	1980 l/h	2.46 m	1100 l/h a 1.5 m

DEBIDO A LAS MEJORES CONSTANTES EL PRODUCTO PUEDE VARIAR EN SU APARIENCIA. ESPECIFICACIONES SUJETAS A CAMBIO SIN PREVIO AVISO.

evans.com.mx 163

A.5. Hoja del fabricante de los relés de estado sólido, serie SSR

Se anexan las páginas 1 y 3 del documento de especificaciones de fabricante de los relés de estado sólido, serie SSR, propiedad de la compañía FOTEK, las cuales fueron empleadas para la obtención de las características y parámetros de relevancia de las variedades de relés utilizadas en el proyecto.

FOTEK SSR SERIES SOLID STATE RELAY



- ★ High Reliability by S.M.T. & TQC.
(Surface Mounting Technology)
- ★ High Isolation over than $50M\Omega$ / 500VDC
- ★ High Dielectric over than 2.5KV
- ★ Low Enable Current less than 7.5mA / 12VDC
C MOS IC or TTL Compatible.
- ★ Low EMI / EFI & Surge by Zero Cross Trigger Method.
- ★ High Surge Current Duration Over 10 Times of Rated Current / One Cycle
- ★ High Surge Voltage Duration by Snubber Circuit.
- ★ 表面貼焊技術及全面品管，提供最可靠的SSR
- ★ 高絕緣阻抗超過 $50M\Omega$ / 500VDC
- ★ 高耐壓超過 2.5KV
- ★ 低觸發電流小於 7.5mA / 12VDC，可與 CMOS IC 及 TTL 匹配
- ★ 零點觸發方式避免電磁 / 高頻干擾
- ★ 高耐過電流，超過10倍額定電流/-週期
- ★ 具緩衝迴路可吸收瞬間突波



Guiding of Model

Terminal Type

Ex.SSR- 40 D A-H
① ② ③ ④ ⑤

① Product 產品別

SSR:SINGLE PHASE SOLID STATE RELAY
單相固態繼電器
STR:THREE PHASE SOLID STATE RELAY
三相固態繼電器

② Output Current 輸出電流

10 : 10A 25 : 25A
40 : 40A 50 : 50A

75 : 75A

③ Input Voltage 輸入方式

D:DC3W~32V<ON/OFF>
A:AC80~250V<ON/OFF>
L:4~20mA(linear)
V:VARIABLE RESISTER

④ Output Voltage 輸出電壓

A:AC VOLTAGE
D:DC VOLTAGE

⑤ Output Voltage Range 輸出電壓範圍

H : High Voltage Type < 90 ~ 480VAC >
Non: Standard Type < 24 ~ 380VAC >

PCB Type

Ex.SSR -P 03 D A
① ② ③ ④ ⑤

① Product 產品別

SSR : SINGLE PHASE SOLID STATE

② Mounting Method 固定方式

PCB:PCB TYPE

③ Output Current 輸出電流

03 = 3A
05 = 5A

④ Input Method 輸入方式

D : DC VOLTAGE

⑤ Output Voltage 輸出電壓

D : DC 5 ~ 60V
A : AC 24 ~ 280V

FOTEK SSR SERIES DC TO AC SOLID STATE RELAY



Specification

Type	Terminal Type					PCB Type						
Model	SSR-10DA	SSR-25DA	SSR-40DA	SSR-25DA-H	SSR-40DA-H	SSR-P03DA						
Rated Load Current	10A	25A	40A	25A	40A	3A						
Input Data												
Operating Voltage	3~32VDC											
Min. ON / OFF Voltage	ON > 2.4V , OFF < 1.0V											
Trigger Current	7.5mA / 12V											
Control Method	Zero Cross Trigger											
Output Data												
Operating Voltage	24~380VAC		90~480VAC		24~380VAC							
Min. Black Voltage	600 VAC < Repetitive >											
Voltage Drop	1.6 V / 25 C											
Max. Durated Current	135A	275A	410A	275A	410A	135A						
Leakage Current	3.0mA	3.0mA	3.0mA	5.0mA	5.0mA	3.0mA						
Response Time	ON < 10ms , OFF < 10ms											
General Data												
Dielectric Strength	Over 2.5KVAC / 1min.											
Isolation Strength	Over $50M\Omega$ / 500VDC											
Operating Temperature	-20 C ~+80 C											
Housing Material	Intensive ABS											
Weight	Appr. 105g				Appr. 15g							
Connection Diagram												

7

Apéndice B

DATOS RECOLECTADOS

B.1. Datos de las pruebas experimentales

Se anexan los datos recolectados durante las pruebas experimentales realizadas por medio de la infraestructura implementada para representar los sensores de pH, conductividad eléctrica y nivel, los cuales se muestran graficados en la sección 5. Debido a la extensión de los datos, la tabulación de estos se dividió en dos secciones, la primera se observa en la tabla B.1 y la segunda en la tabla B.2.

Tabla B.1: Datos recolectados durante las pruebas experimentales al sistema, primera parte.

Hora	Abs seg	pH	EC (mS/cm)	Temp. (°C)	Nivel	B. Circ	B. Urea	B. Sust. A
18:31:19	79	5.63	0	25	Normal	0	0	0
18:31:29	89	5.77	0.18	25	Normal	0	0	0
18:31:39	99	5.77	0.42	25	Normal	1	0	1
18:31:49	109	5.77	0.39	25	Mínimo	0	0	0
18:31:59	119	5.77	0.42	25	Mínimo	0	0	0
18:32:09	129	5.74	0.45	25	Normal	1	0	1
18:32:19	139	5.77	0.45	25	Máximo	0	0	0
18:32:29	149	5.77	0.45	25	Máximo	0	0	0
18:32:39	159	5.77	0.42	25	Máximo	1	0	1
18:32:49	169	6.18	0.60	25	Normal	0	0	0
18:32:59	179	6.15	0.60	25	Normal	0	0	0
18:33:09	189	6.18	0.60	25	Normal	1	0	1
18:33:19	199	6.40	0.83	25	Normal	0	0	0
18:33:29	209	6.68	1.01	25	Normal	0	0	0
18:33:39	219	6.73	1.01	25	Normal	1	1	1
18:33:49	229	7.06	1.13	25	Normal	0	0	0
18:33:59	239	7.47	1.43	25	Normal	0	0	0

Tabla B.2: Datos recolectados durante las pruebas experimentales al sistema, segunda parte.

Hora	Abs seg	pH	EC (mS/cm)	Temp. (°C)	Nivel	B. Circ	B. Urea	B. Sust. A
18:34:09	249	7.75	1.67	25	Normal	1	1	0
18:34:19	259	7.91	1.73	25	Normal	0	0	0
18:34:29	269	8.41	1.99	25	Normal	0	0	0
18:34:39	279	8.41	1.99	25	Normal	1	1	0
18:34:49	289	8.49	2.05	25	Normal	0	0	0
18:34:59	299	8.52	2.02	25	Normal	0	0	0
18:35:09	309	8.49	2.02	25	Normal	1	1	0
18:35:20	320	8.30	1.91	25	Normal	0	0	0
18:35:30	330	7.97	1.61	25	Normal	1	1	0
18:35:40	340	7.97	1.61	25	Normal	1	1	0
18:35:50	350	7.61	1.31	25	Normal	0	0	0
18:36:00	360	7.20	1.13	25	Normal	1	1	1
18:36:10	370	7.12	1.07	25	Normal	1	1	1
18:36:20	380	6.65	0.89	25	Normal	0	0	0
18:36:30	390	6.65	0.54	25	Normal	1	1	1
18:36:40	400	6.24	0.54	25	Normal	1	0	1
18:36:50	410	5.91	0.27	25	Normal	0	0	0
18:37:00	420	5.91	0	25	Normal	1	0	1
18:37:10	430	5.68	0	25	Normal	1	0	1
18:37:20	440	5.68	0	25	Normal	0	0	0
18:37:30	450	5.63	0	25	Normal	1	0	1
18:37:40	460	5.66	0	25	Normal	1	0	1
18:37:50	470	5.60	0.03	25	Normal	0	0	0
18:38:00	480	5.57	0.12	25	Normal	1	0	1
18:38:10	490	5.60	0.06	25	Normal	1	0	1
18:38:20	500	5.57	0.09	25	Normal	0	0	0
18:38:30	510	5.57	0.06	25	Normal	1	0	1
18:38:40	520	5.41	0.42	25	Normal	1	0	1
18:38:50	530	5.24	0.66	25	Normal	0	0	0
18:39:00	540	5.46	0.33	25	Normal	1	0	1

Bibliografía

- [1] Arduino: “ARDUINO UNO REV3”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3yJykVN>. [Accedido: 21 de mayo, 2021].
- [2] Beltrano, J. y D. Gimenez: *Cultivo en hidroponía*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), Buenos Aires, Argentina, primera edición, 2015.
- [3] Brenes, L. y M. Jiménez: *Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistemas NFT (Nutrient Film Technique)*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, primera edición, 2016.
- [4] CRCibernética: “Side-mounted Liquid Level Switch”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3uvch1C>. [Accedido: 24 de mayo, 2021].
- [5] DFRobot: “DFR0300 Gravity Analog Electrical Conductivity Sensor Meter V2 K=1”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3fqVVTr>. [Accedido: 20 de mayo, 2021].
- [6] DFRobot: “SEN0161-V2 Gravity Analog pH Sensor Meter Kit V2”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3uAeBET>. [Accedido: 20 de mayo, 2021].
- [7] MicroJPM: “120VAC Water Heater Boiler Portable Electric”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3uxpGpQ>. [Accedido: 24 de mayo, 2021].
- [8] Torrente, O.: *Arduino. Curso práctico de formación*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., Col. del Valle, 03100, México, primera edición, 2013.
- [9] Zárate, M.: *Manual de hidroponía*. Instituto de Biología www.ibiologia.unam.mx, C.P. 04510, México, primera edición, 2014.