

UNIVERSIDAD LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

INGENIERÍA AMBIENTAL

CONSTRUCCIÓN DE UN CULTIVO
HIDROPÓNICO CON UN SISTEMA DE
MONITOREO BASADO EN IoT

Alumnos

ARRAZOLA Daniela
CONTRERAS Daniel
FLORES Luis
FLORES David
ORBEZO Diego

Profesor

M.C. MÁRQUEZ Laura

17 de noviembre de 2021



ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	¿Qué es la hidroponía?	1
1.2	El panorama actual de la agricultura	2
1.3	Implementación de la tecnología IoT	2
1.4	Objetivo	3
1.5	Justificación	3
1.6	Hipótesis	5
2	ANTECEDENTES	6
3	DESARROLLO	8
3.1	Variables	8
3.1.1	pH	8
3.1.2	Conductividad eléctrica	8
3.1.3	Rangos recomendados	9
3.2	Equipos y materiales	9
3.3	Metodología	10
3.3.1	Microcontrolador	10
3.3.2	Sistema de irrigación	10
3.3.3	Sonda de pH	11
3.3.4	Sonda de conductividad eléctrica	13
3.3.5	Circuitos de medición	14
3.3.6	Sistema de suministro de soluciones	14
3.3.7	Integración	16
3.4	Trasplante de las plántulas	17
4	RESULTADOS	18
4.1	Primer grupo de plántulas	18
4.2	Segundo grupo de plántulas	19
4.3	Datos recolectados vía IoT	20
4.4	Análisis de los resultados	20
5	CONCLUSIÓN	22
5.1	Limitaciones y trabajos futuros	22
	BIBLIOGRAFÍA	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Sistema hidropónico (Torres, 2019).	1
Figura 3.1	Tarjeta de desarrollo Metro ESP32-S2 de Adafruit (Rembor, 2020).	10
Figura 3.2	Sistema hidropónico vertical NFT (Ciri, 2021).	11
Figura 3.3	Medición de pH (Press, 2021b).	12
Figura 3.4	Medición de C.E. (Press, 2021a).	13
Figura 3.5	Circuitos de medición de Atlas Scientific (Press, 2021a, 2021b).	14
Figura 3.6	Sistema de suministro automático (Press, 2020).	15
Figura 3.7	Diagrama de flujo del sistema desarrollado.	16
Figura 3.8	Montaje del sistema desarrollado.	17
Figura 3.9	Proceso de trasplante de las plántulas.	17
Figura 4.1	Síntomas de la pudrición de raíces en el primer grupo de plántulas..	19
Figura 4.2	Segundo grupo de plántulas después de una semana del trasplante.	19
Figura 4.3	Información recopilada de las variables del sistema en los períodos comprendidos del 01/11/2021 al 08/11/2021 (Semana 1) y del 09/11/2021 al 16/11/2021 (Semana 2).	20

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Rangos recomendados de valores de pH y C.E. en solución para cultivos hidropónicos comunes (Bluelab, 2020). 9
Tabla 3.2	Especificaciones técnicas de la sonda de pH de Atlas Scientific (Press, 2021b). 12
Tabla 3.3	Especificaciones técnicas de la sonda de C.E. de Atlas Scientific (Press, 2021a). 14
Tabla 3.4	Especificaciones técnicas de la bomba peristáltica de Atlas Scientific (Press, 2020). 15

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



Figura 1.1: Sistema hidropónico (Torres, 2019).

1.1 ¿QUÉ ES LA HIDROPONÍA?

La hidroponía es la técnica de cultivar plantas sin el uso de tierra (Figura 1.1). Las raíces crecen en el aire, que se mantiene muy húmedo; en agua bien aireada; o en algún medio sólido que no sea tierra, que se mantiene húmedo

(Mason, 2011). Las raíces griegas, *hidro* y *ponos*, que significan agua y trabajo, respectivamente, dan una definición clara del término como trabajo con agua (Mohammed, 2018).

Las plantas requieren de una serie de minerales para poder crecer sanamente. En el cultivo tradicional, una gran parte de estos elementos se obtienen naturalmente del suelo. Debido a que la hidroponía no utiliza tierra, el agua alrededor de las raíces contiene una mezcla cuidadosamente equilibrada de nutrientes que proporciona alimento a la planta (Anpo y col., 2018). De esta manera, se tiene el potencial de administrar el crecimiento de manera más efectiva que lo que es posible cuando se cultiva en la tierra (Mason, 2018).

1.2 EL PANORAMA ACTUAL DE LA AGRICULTURA

La agricultura ha sido una de las principales ocupaciones del hombre desde el surgimiento de la civilización. Esta actividad juega un papel importante en el desarrollo económico de los países y se considera esencial en la vida humana (Siddiq y col., 2020). Sin embargo, en los últimos años la producción de cultivos se ha visto afectada por factores como el cambio climático y el crecimiento poblacional.

Se estima que para 2050 la población mundial será de 9 mil millones, lo que aumentará la necesidad de alimentos en un 70 % (Siddiq y col., 2020). No obstante, el deterioro ambiental ha resultado en la escasez de recursos esenciales como el agua y en la baja disponibilidad de suelo para fines agrícolas. Por lo tanto, la agricultura enfrenta una disminución de la producción y la calidad de los cultivos (Chowdhury y col., 2020). Estas condiciones hacen necesario el uso de fertilizantes y pesticidas para obtener una mejor cosecha, pese a que significan un daño al medio ambiente (Ullah y col., 2019).

Uno de los mecanismos utilizados por la industria alimentaria para superar este déficit en el rendimiento es el uso de la agricultura hidropónica donde se controlan parámetros ambientales como temperatura, humedad, cantidad de luz, niveles de pH, entre otros (Siddiq y col., 2020). La producción con ambiente controlado implica técnicas de cultivo más sofisticadas que las empleadas comúnmente en el campo. Sin embargo, la hidroponía es un enfoque menos derrochador que incluye la reducción de residuos, la preservación de las reservas de agua y una menor dependencia de pesticidas, fertilizantes y otros materiales potencialmente dañinos (Ullah y col., 2019). Además, la técnica de cultivo hidropónico vertical reduce significativamente la cantidad de espacio requerido abriendo la posibilidad a la agricultura urbana (Chowdhury y col., 2020).

1.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA IOT

En un inicio, los sistemas hidropónicos se controlaban manualmente, lo que resultaba en una baja productividad de los cultivos debido a un método ineficiente y un control inadecuado de los parámetros ambientales. Posterior-

mente, se introdujo la hidroponía automatizada para superar los problemas que se producían mediante el control manual (Siddiq y col., 2020).

En un sistema hidropónico automatizado, los nutrientes se monitorean y controlan con frecuencia para garantizar que los parámetros importantes se mantengan y optimicen; mediante el uso de múltiples sensores, actuadores y procesadores. Ampliando aún más el concepto, el sistema agrícola puede estar conectado a Internet; permitiéndole intercambiar datos y, por lo tanto, creando oportunidades de integración al mundo físico con el fin de mejorar su eficiencia (Esa y col., 2018).

El Internet de las Cosas, o IoT por sus siglas en inglés, se refiere a la conexión vía Internet de dispositivos con capacidades de interacción y cooperación (Marques y col., 2019). En muchas aplicaciones, esta integración se realiza con el propósito de almacenar datos en la nube para su análisis (Mehra y col., 2018). La idea básica de usar IoT en la agricultura es que permite usar múltiples sensores con la capacidad de transferir datos a través de la red. Con ello se consigue que la supervisión y control se lleven a cabo de forma remota en tiempo real (Mody & Mathew, 2019).

La integración de IoT puede aumentar el crecimiento de las plantas debido a que mantiene el valor nutricional y reduce los costos de mantenimiento de las plantas en alrededor de un 23 % a un 70 % (Herman y col., 2019). Además, puede ser una forma eficiente de producir cultivos óptimos con un impacto ambiental y recursos reducidos (Ullah y col., 2019).

1.4 OBJETIVO

Construir un cultivo hidropónico con la implementación de un sistema de control y monitoreo automatizado basado en IoT.

1.5 JUSTIFICACIÓN

En cualquier forma de agricultura, siempre existen aspectos positivos y negativos relacionados. El margen entre estos es lo que determina el diseño y la técnica de cultivo más adecuados para lograr la máxima producción.

En el caso de la hidroponía, las ventajas generales son (Mohammed, 2018):

- Se evita el suelo contaminado con enfermedades: El suelo tiene varias características asociadas dependiendo de su ubicación. Algunos ambientes están más contaminados que otros y esto puede expresarse en el suelo en forma de contaminantes químicos, microbianos o físicos. Esto puede provocar que la textura del suelo cambie, la capacidad para retener nutrientes se vea afectada y las reacciones químicas entre los productos químicos deseados y no deseados pueden afectar drásticamente lo que se alimenta a las plantas.
- Se reduce o elimina la mano de obra para el manejo del campo: Bajo la técnica de hidroponía hay menos trabajo manual ya que no hay necesi-

dad de preparar la tierra como arar, cavar hoyos o incluso terraplenes. La construcción del sistema se convierte la máxima cantidad de trabajo.

- Sistema económicamente viable con altos rendimientos.
- Mejor control y menor concentración de nutrientes: Cuando se cultiva en la tierra, los nutrientes se pierden fácilmente. Sin embargo, en hidroponía, existe un control total de los nutrientes que se suministran al sistema.
- Uso de semillas tratadas contra enfermedades: Dado que existe un control total en la hidroponía y no se está utilizando tierra, la reducción de enfermedades se reduce drásticamente. Por lo que, al usar semillas tratadas contra enfermedades, la producción de plantas sanas aumenta enormemente.
- Conservación del agua: El agua se recicla.
- Estadísticas constantes: A medida que los precios del mercado fluctúan continuamente debido a varios factores como inundaciones, plagas y enfermedades, y porciones adecuadas de nutrientes, el precio de mercado de la venta de sus productos se vuelve más controlado.
- Elimina problemas ambientales como el frío y el calor excesivos, el viento y la lluvia.
- Aumenta el rendimiento, el tamaño, la calidad y el sabor de los productos cultivados, el color y la vida útil. Se producen plantas más saludables ya que existe un control total del sistema.
- Aumenta la resistencia a insectos/enfermedades de las plantas.
- Elimina la calidad del agua y la contaminación del suelo (principales fuentes de contaminación microbiana).
- Requiere menos espacio: Se cultivan más plantas en menos espacio
- Requiere menos tiempo de crecimiento.
- Se reduce la mano de obra y el mantenimiento del jardín: Con un sistema hidropónico, la mano de obra se reduce en gran medida ya que las habilidades necesarias son más técnicas. No es necesario deshierbar ni moldear.
- Los nutrientes son reciclables: Los nutrientes ya no se pierden a medida que circulan a través de las tuberías de regreso al depósito y nuevamente a través de las tuberías.
- Se reduce el impacto del trasplante para las plántulas: Las plantas se pueden cultivar desde la etapa de plántula en el sistema hidropónico. A medida que crecen, se pueden hacer ajustes a la solución de nutrientes para que no haya un impacto repentino en la planta.

- No es necesaria la rotación de cultivos: La solución nutritiva ahora se mezcla y se agrega directamente, no depende de la tierra.
- Menor impacto en el medio ambiente (menos pesticidas e insecticidas).
- La vida útil de los productos agrícolas es mucho más larga: El uso de una amplia gama de productos químicos puede afectar la capacidad de vida útil de las plantas. Las alteraciones del clima también disminuyen la vida útil de las plantas, ya que son más susceptibles a dañarse.

Hay algunas desventajas asociadas con la hidroponía como (Mohammed, 2018):

- Costo: El costo de los sistemas puede ser muy económico, pero también extremadamente elevado. Dado que la hidroponía implica el uso de tecnología para el cultivo, puede resultar muy costosa si no se brinda la consulta adecuada. Sin embargo, todo depende del nivel de producción que se desee alcanzar, la ubicación, el diseño, los cambios estacionales y sobre todo el costo dispuesto a invertir.
- Personal capacitado: El conocimiento de la química y la agricultura es muy importante en hidroponía. La preparación y mezcla de nutrientes debe ser precisa, junto con el análisis del contenido de pH y CE.
- Rápida propagación de una enfermedad: Dado que los nutrientes siempre fluyen y circulan, una vez que ingresa una enfermedad, se distribuirá rápidamente a todas las demás plantas.
- Sistema de respaldo: Si no hay bombas o generadores de respaldo, esto puede provocar una pérdida grave en la producción. El sistema debe ser monitoreado para evitar fallas eléctricas ya que la electricidad es muy importante para la circulación de nutrientes en todo el sistema.
- Obstrucción del sistema debido al gran tamaño de las raíces de las plantas.

En términos generales, se puede establecer que las ventajas de la hidroponía superan a las desventajas. La eliminación de la tierra en esta técnica representa grandes beneficios al reducir el costo y el tiempo de cultivo. Gracias a la integración de tecnologías como IoT para controlar de manera más eficiente los parámetros ambientales, la hidroponía ha evolucionado para adaptarse a las necesidades actuales. De esta manera, se ha convertido en una solución factible para las contrarrestar las adversidades de la agricultura moderna.

1.6 HIPÓTESIS

Si el control de parámetros ambientales en un cultivo hidropónico se lleva a cabo de forma automática mediante la implementación de múltiples sensores y actuadores, y su integración mediante IoT, entonces se conseguirá que el crecimiento de las plantas sea el óptimo.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Debido a los inconvenientes de las técnicas manuales de hidroponía, la integración de un sistema de control automático en este tipo de cultivos se ha discutido en muchos artículos y sigue siendo un campo de investigación abierto. A continuación, se presentan una serie de recopilaciones breves de trabajos relacionados:

- Siddiq y col. (2020) desarrollaron un método eficaz denominado Agricultura Hidropónica Controlada Automáticamente (ACHPA, por sus siglas en inglés) que monitorea y controla los parámetros ambientales mediante sensores y controladores.
- En el estudio de Mody y Mathew (2019) se lleva a cabo una revisión crítica de los sistemas hidropónicos actuales considerando varios parámetros como eficiencia energética, costo y tipo de diseño.
- Dudwadkar y col. (2020) aseguran que, en un ambiente controlado y con la ayuda de actuadores presentes en el sistema, un cultivo hidropónico alcanza una mayor tasa de crecimiento.
- Ullah y col. (2019) proponen un sistema IoT que monitorea y controla todos los parámetros del sistema hidropónico como nivel de agua, pH, humedad y temperatura a través de una aplicación móvil.
- Chowdhury y col. (2020) exponen en su estudio el diseño y construcción de un sistema hidropónico vertical automático interior que no depende del clima exterior.

- Lukito y Lukito (2018) remarcan la importancia de la observación remota de sistemas hidropónicos, desarrollando un sistema de monitoreo integrando la tecnología IoT.
- Marques y col. (2019) presentan una aplicación móvil para consultoría de datos y análisis en tiempo real de cultivos hidropónicos llamada iHydroIoT.
- Palande y col. (2018) crearon un sistema automático basado en microcontroladores y sensores conectados a internet, que puede cultivar plantas y vegetales con la técnica de hidroponía sin depender del clima exterior.
- En el estudio de Herman y col. (2019) utilizan la lechuga como objeto de experimento y aplican el algoritmo k-NN para predecir la clasificación de las condiciones de los nutrientes, proponiendo un sistema electrónico que mide los valores de pH, TDS y temperatura.
- Nurhasan y col. (2018) analizaron las necesidades de un sistema hidropónico y desarrollaron un sistema de monitoreo de la circulación de agua para anticipar cambios en los elementos de crecimiento de las plantas.
- El trabajo desarrollado por Mehra y col. (2018) exhibe un sistema hidropónico inteligente basado en IoT, que emplea redes neuronales para proporcionar la acción de control adecuada en el entorno hidropónico en función de múltiples parámetros de entrada.
- Azimi y col. (2020) construyeron un sistema hidropónico inteligente con mediciones de pH, conductividad eléctrica, temperatura y tasa de flujo monitoreadas por una red sensores basada en IoT.
- El estudio de Esa y col. (2018) reporta el efecto de diferentes niveles de intensidad de luz sobre el crecimiento de las plantas, mostrando un crecimiento de casi el 100 % utilizando luz LED, en comparación con la iluminación natural.
- Patil y col. (2020) elaboraron un sistema hidropónico automatizado donde los cultivos reciben agua y nutrientes dependiendo de la retroalimentación de sensores de temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica.
- Herman y Surantha (2020) implementaron el uso de IoT y algoritmos de lógica difusa en su investigación, para llevar a cabo la toma de decisiones de forma más eficiente y precisa en el suministro de nutrientes, la gestión de pH y la temperatura, en un sistema automático de cultivo de hidroponía.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO

3.1 VARIABLES

3.1.1 pH

Los iones de hidrógeno e hidroxilo que determinan el pH juegan un papel particularmente importante en la disponibilidad de nutrientes en una solución. Estos pueden interactuar y unirse a los iones de los nutrientes y hacer que se desprendan de la solución en forma insoluble, lo que significa que la planta es incapaz de reconocerlos y absorberlos. Si esto sucede, se produce un desperdicio de nutrientes (Bluelab, 2020).

Cada ion de los nutrientes tiene un rango de pH dentro del cual será soluble (disponible para la planta). Fuera de este rango, los iones podrían interactuar o cambiar su forma química y dejar de estar disponibles. Esto resulta en una de las principales causas de deficiencia de nutrientes. El sistema desarrollado mide y controla el pH para que todos los iones de nutrientes sean solubles, y con ello lograr el crecimiento saludable de las plantas.

3.1.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de una solución nutritiva es una medida vital para determinar el total de nutrientes disponibles. Cuando los nutrientes (u otras sales) se disuelven en agua, se dividen en iones. Los iones permiten que el agua conduzca la electricidad. Sin estos iones, el agua no es un buen conductor. Cuantos más iones haya, mejor conducirá la electricidad el agua (Bluelab, 2020).

La relevancia de este parámetro es que solo los nutrientes que están en forma iónica se encuentran disponibles para ser absorbidos por las plantas. Por lo tanto, el sistema mide la conductividad eléctrica del agua para determinar la efectividad de la solución de nutrientes del cultivo. Si bien no brinda información sobre los nutrientes individuales, es una guía muy útil para conocer su estado general.

3.1.3 Rangos recomendados

En la Tabla 3.1 se presentan los rangos óptimos para los valores de pH y C.E. de cultivos que comúnmente se emplean en sistemas hidropónicos.

Tipo	Rango de pH óptimo	Rango de C.E. óptimo (mS/cm)
Lechuga	6.0-7.0	0.4-1.2
Albaca	5.5-6.5	1.0-1.4
Espinaca	5.5-6.6	1.8-2.3

Tabla 3.1: Rangos recomendados de valores de pH y C.E. en solución para cultivos hidropónicos comunes (Bluelab, 2020).

Si bien es posible cultivar en un mismo sistema espinaca, albaca y lechuga; se seleccionó esta última para el desarrollo de la investigación con el fin de aumentar las posibilidades de desarrollo de la planta.

3.2 EQUIPOS Y MATERIALES

A continuación, se enlistan los equipos y materiales utilizados para la construcción del cultivo hidropónico y los sistemas de monitoreo y control automáticos:

- Microcontrolador
- Torre modular impresa en 3D
- Bomba sumergible
- Sonda de pH
- Sonda de conductividad eléctrica
- Circuitos de medición
- Bombas peristálticas
- Soluciones reguladoras de pH
- Soluciones de nutrientes

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 *Microcontrolador*

Un microcontrolador es un de circuito integrado que se utiliza para controlar otras partes de un sistema electrónico a través de una unidad de microprocesador, memoria y algunos periféricos. Este dispositivo está optimizado para aplicaciones integradas que requieren tanto funcionalidad de procesamiento como una interacción ágil y receptiva con componentes digitales, analógicos o electromecánicos (Keim, 2019).

La palabra "periférico" hace referencia a los módulos de hardware que ayudan a un microcontrolador a interactuar con el sistema externo. En el caso específico de la aplicación descrita en esta investigación, el microcontrolador recopila la información de los sensores empleados para monitorear el cultivo hidropónico, para posteriormente ejecutar decisiones de control a través de los actuadores. Este circuito integrado se encuentra embebido en una tarjeta de desarrollo (Figura 3.1) que hace accesible la conexión de otros dispositivos.

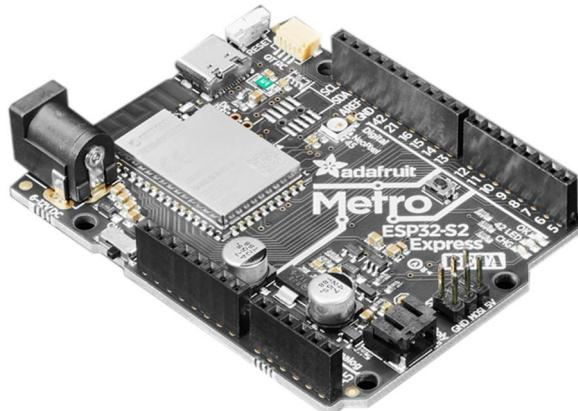


Figura 3.1: Tarjeta de desarrollo Metro ESP32-S2 de Adafruit (Rembor, 2020).

3.3.2 *Sistema de irrigación*

La Técnica de Película de Nutrientes (NFT, por sus siglas en inglés) se considera el sistema más utilizado en hidroponía. Consiste en un tipo de irrigación en la cual la solución de nutrientes en forma de una película delgada circula a través del sistema. Esta técnica es ideal para cultivos a corto plazo como lechuga, cultivos de hojas y hortalizas a base de hierbas. Los sistemas NFT más grandes se pueden adaptar a la producción de cultivos a largo plazo, como pepinos y tomates (Mohammed, 2018).

Para el desarrollo de la investigación, se empleó la estructura presentada en la Figura 3.2 como sistema de irrigación para el cultivo hidropónico. La construcción consiste en una torre que conecta el depósito principal con las diferentes tomas. La solución de nutrientes puede circular a través del

sistema gracias a una bomba sumergible. Los parámetros de operación de este actuador son definidos por el microcontrolador.

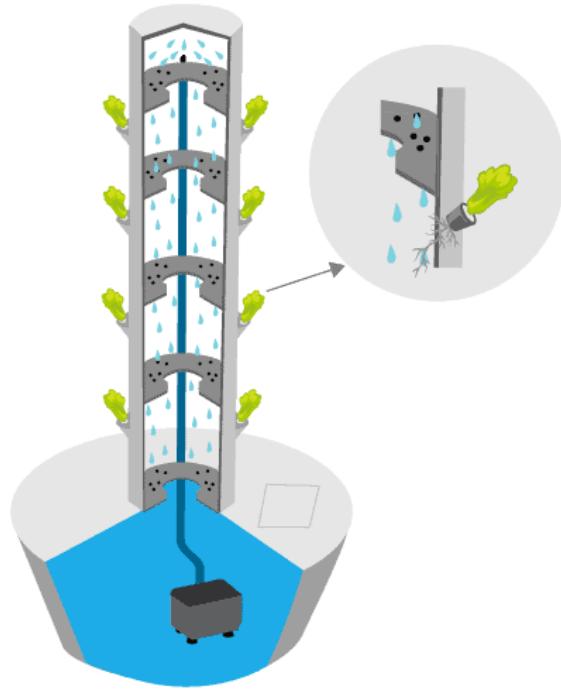


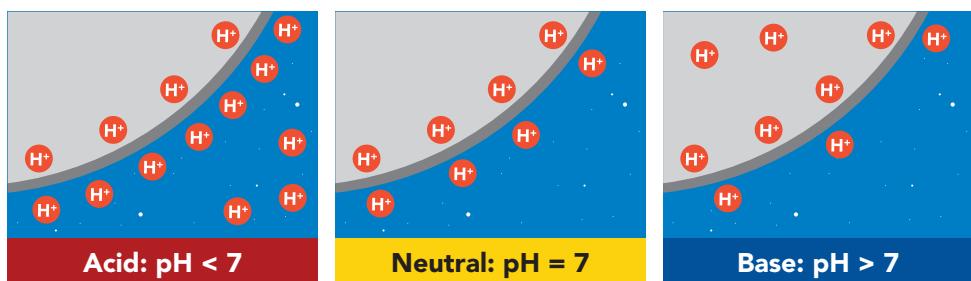
Figura 3.2: Sistema hidropónico vertical NFT (Ciri, 2021).

3.3.3 Sonda de pH

Una sonda de pH (potencial de hidrógeno) mide la actividad de los iones de hidrógeno en un líquido (Figura 3.3a). En la punta de una sonda de pH se encuentra una membrana de vidrio. Esta membrana permite que los iones de hidrógeno del líquido se difundan en la capa exterior del vidrio, mientras que los iones más grandes permanecen en la solución (Figura 3.3b). La diferencia en la concentración de iones de hidrógeno (fuera de la sonda vs. dentro de la sonda) crea una corriente muy pequeña. Esta corriente es proporcional a la concentración de iones de hidrógeno en el líquido que está siendo medido (Press, 2021b).



(a) Sonda de pH de Atlas Scientific.



(b) Principio de funcionamiento.

Figura 3.3: Medición de pH (Press, 2021b).

En la Tabla 3.2 se presentan las especificaciones técnicas de la sonda de pH empleada en el desarrollo de la investigación.

Parámetro	Valor
Lectura	pH
Rango	2-13
Resolución	± 0.1
Precisión	± 0.1
Tiempo de respuesta	95 % en 4 s
Rango de temperatura	1-60 °C
Presión máxima	344 kPa
Profundidad máxima	35 m

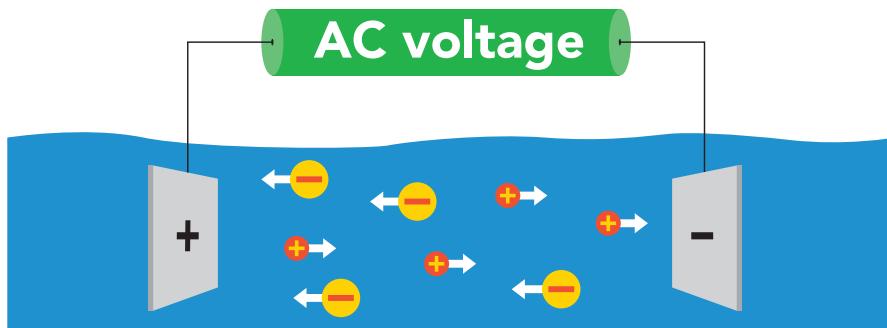
Tabla 3.2: Especificaciones técnicas de la sonda de pH de Atlas Scientific (Press, 2021b).

3.3.4 Sonda de conductividad eléctrica

Una sonda de C.E. (conductividad eléctrica) mide la conductividad eléctrica en una solución (Figura 3.4a). Dentro de la sonda, dos electrodos se colocan uno frente al otro, se aplica un voltaje de CA a los electrodos causando que los cationes se muevan al electrodo cargado negativamente, mientras que los aniones se mueven al electrodo positivo (Figura 3.4b). Cuanto más electrolito libre contenga el líquido, mayor será la conductividad eléctrica (Press, 2021a).



(a) Sonda de C.E. de Atlas Scientific.



(b) Principio de funcionamiento.

Figura 3.4: Medición de C.E. (Press, 2021a).

En la Tabla 3.3 se presentan las especificaciones técnicas de la sonda de E.C. empleada en el desarrollo de la investigación.

Parámetro	Valor
Lectura	Conductividad
Rango	5-200,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Precisión	$\pm 2 \%$
Tiempo de respuesta	90 % en 1 s
Rango de temperatura	1-110 °C
Presión máxima	3,447 kPa
Profundidad máxima	352 m

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas de la sonda de C.E. de Atlas Scientific (Press, 2021a).

3.3.5 Circuitos de medición

Las tarjetas EZO-pH y EZO-EC de Atlas Scientific (Figura 3.5) son circuitos que llevan a cabo un complejo proceso de amplificación y acondicionamiento de las pequeñas señales eléctricas generadas por las sondas de pH y C.E. Una vez que estas lecturas analógicas pueden ser interpretadas, se convierten en señales digitales para luego ser transmitidas a través de un protocolo de comunicación fácil de implementar con el microcontrolador. Al tratarse de variaciones de voltaje mínimas, estos dispositivos electrónicos resultan muy sensibles. Esta sensibilidad es lo que le brinda al circuito una gran precisión, ofreciendo las mismas capacidades y funcionalidad que tradicionalmente solo se encuentran en costosos medidores de sobremesa (Press, 2021a, 2021b).



(a) Tarjeta EZO-pH.



(b) Tarjeta EZO-EC.

Figura 3.5: Circuitos de medición de Atlas Scientific (Press, 2021a, 2021b).

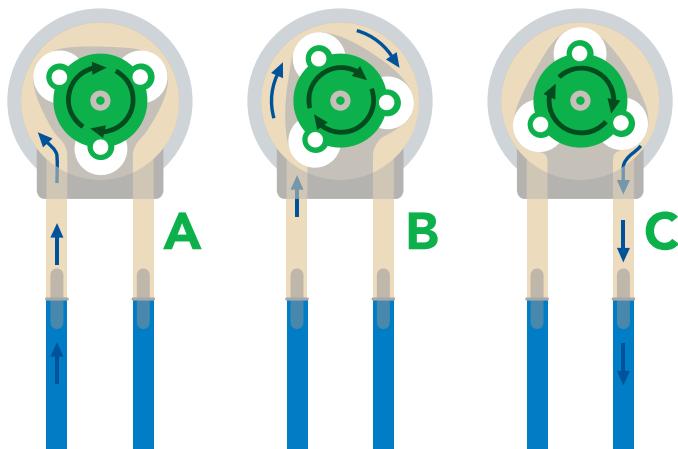
3.3.6 Sistema de suministro de soluciones

Una bomba peristáltica es un tipo de bomba de desplazamiento positivo que se utiliza para suministrar pequeñas cantidades de fluido (Figura 3.6a). El fluido se encuentra contenido dentro de un tubo flexible instalado dentro de una carcasa circular. Como se muestra en la Figura 3.6b, cuando el rotor

gira continuamente, el fluido en el tubo se comprime y se suministra en el extremo contrario (Press, 2020). De esta manera, el caudal de líquido se puede controlar con precisión.



(a) Bomba peristáltica de Atlas Scientific.



(b) Principio de funcionamiento.

Figura 3.6: Sistema de suministro automático (Press, 2020).

En la Tabla 3.4 se presentan las especificaciones técnicas de las bombas peristálticas empleadas en el desarrollo de la investigación.

Parámetro	Valor
Tasa de flujo	0.5-105 ml/min
Precisión	±1 %
Viscosidad	0.1-2,000 cP

Tabla 3.4: Especificaciones técnicas de la bomba peristáltica de Atlas Scientific (Press, 2020).

La bomba peristáltica de Atlas Scientific integra un circuito de control para el motor. La señal digital requerida para determinar la dirección y velocidad de flujo de la bomba es compatible con la interfaz del microcontrolador. Al comportarse como una bomba dosificadora, este dispositivo se utilizó como un actuador en el sistema de suministro automático de las soluciones reguladoras de pH y de nutrientes.

3.3.7 Integración

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo simplificado del funcionamiento del sistema. Este esquema representa el trabajo conjunto de sensores, actuadores y microcontrolador para monitorear las variables de pH y C.E. del agua que circula en el cultivo, controlarlas a través del sistema de suministro automático y con ello generar las mejores condiciones para que las plantas crezcan de forma saludable.

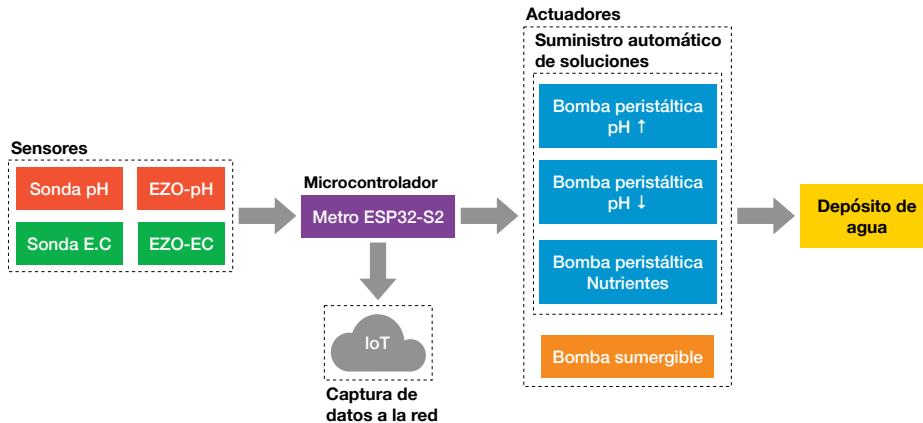


Figura 3.7: Diagrama de flujo del sistema desarrollado.

El montaje de todos los elementos descritos anteriormente se presenta en la Figura 3.8a. Se puede observar la torre impresa en 3D conformada por 6 módulos, cada uno con dos tomas disponibles contando así con una capacidad de cultivo de 12 plantas. El sistema de control y monitoreo se observa a la izquierda y por debajo las soluciones reguladoras de pH y de nutrientes. La Figura 3.8b muestra el tanque que suministra el agua con la bomba sumergible, además de las sondas de pH y C.E.



(a) Torre con 6 módulos y 12 espacios.



(b) Tanque de suministro de agua.

Figura 3.8: Montaje del sistema desarrollado.

3.4 TRASPLANTE DE LAS PLÁNTULAS

En la Figura 3.9 se presenta el proceso que se siguió para trasplantar cada una de las plántulas al sistema hidropónico.



(a) Plántula con sustrato.



(b) Plántula lavada.



(c) Plántula trasplantada.

Figura 3.9: Proceso de trasplante de las plántulas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Los resultados de la investigación se pueden dividir en dos grupos de plántulas. Cada uno permaneció una semana en el sistema y fueron sometidos a condiciones diferentes de pH y C.E.

4.1 PRIMER GRUPO DE PLÁNTULAS

Para el primer caso, la bomba sumergible funcionó de forma intermitente en períodos de 15 minutos. El sistema gestionaba el suministro de las soluciones reguladores de pH y los nutrientes cada 30 minutos. El llenado del tanque se realizó con agua de la llave. Debido a un exceso en la cantidad de sales disueltas en el tanque, la totalidad de las plántulas presentaron pudrición de las raíces y no pudieron permanecer en el cultivo debido a su muerte paulatina (Figura 4.1).

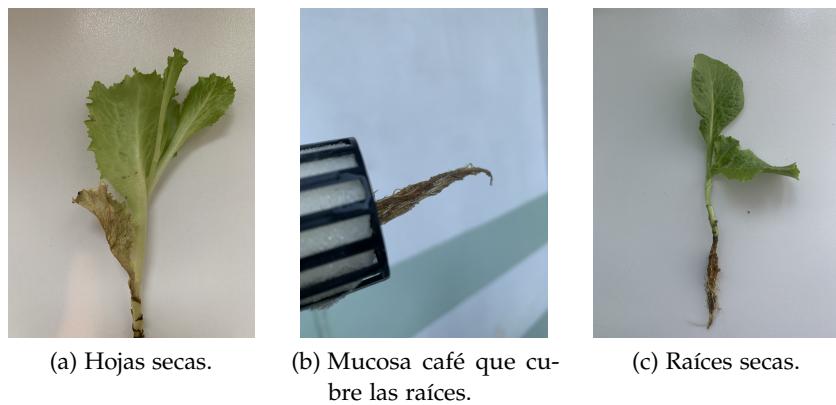


Figura 4.1: Síntomas de la pudrición de raíces en el primer grupo de plántulas..

4.2 SEGUNDO GRUPO DE PLÁNTULAS

En el nuevo grupo las condiciones de operación de las bombas cambió. La bomba sumergible funcionó de forma continua y el suministro de las soluciones reguladores de pH y los nutrientes cada 60 minutos. En esta ocasión se empleó agua embotellada para llenar el tanque del sistema. Todas las plántulas consiguieron crecer de forma saludable debido a un mejor control en las condiciones de C.E. (Figura 4.2).

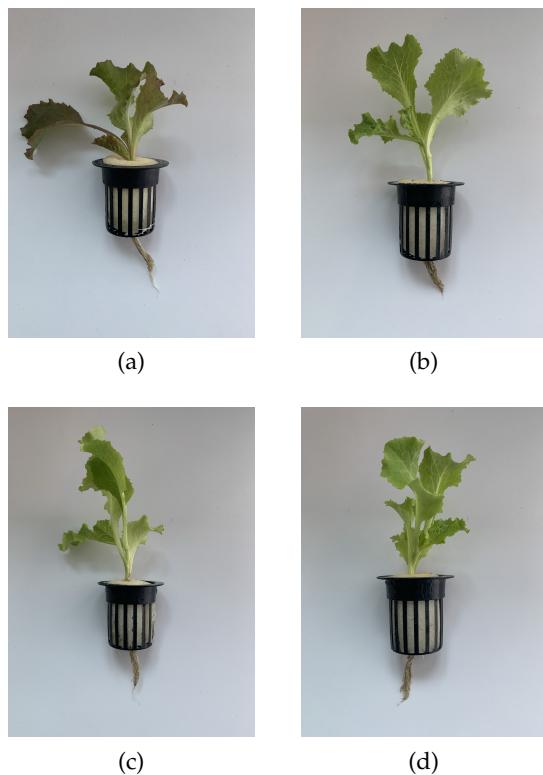
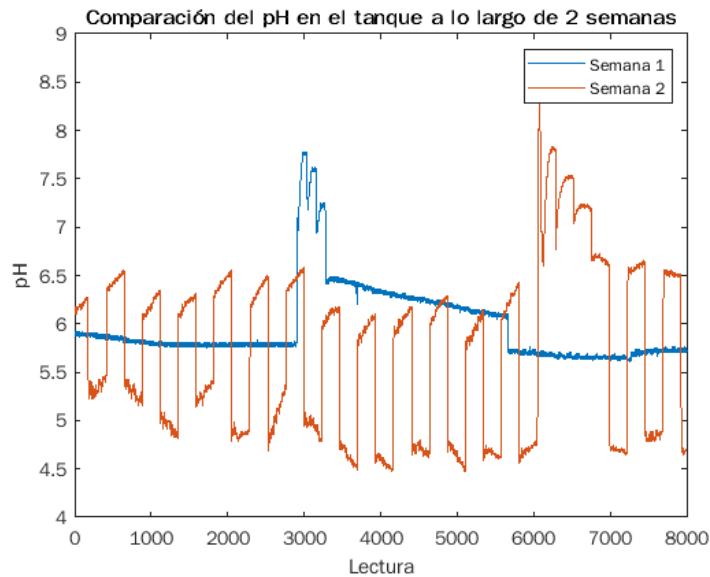
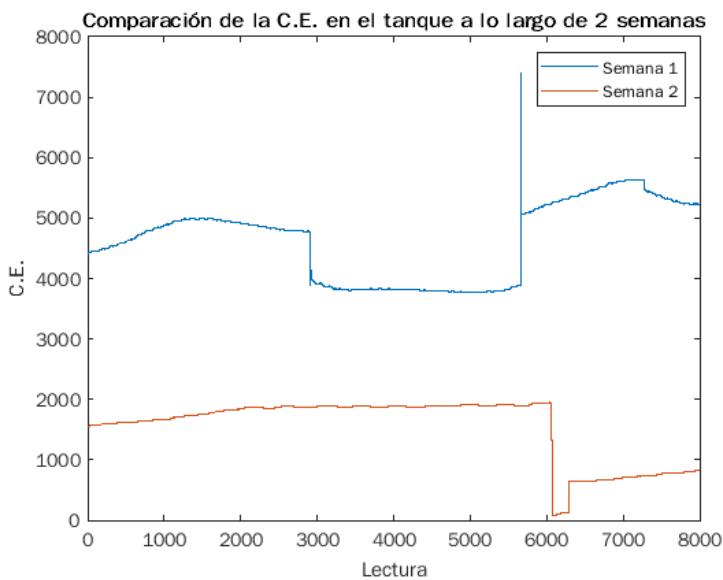


Figura 4.2: Segundo grupo de plántulas después de una semana del trasplante.

4.3 DATOS RECOLECTADOS VÍA IOT



(a) Lecturas de la sonda de pH.



(b) Lecturas de la sonda de C.E.

Figura 4.3: Información recopilada de las variables del sistema en los períodos comprendidos del 01/11/2021 al 08/11/2021 (Semana 1) y del 09/11/2021 al 16/11/2021 (Semana 2).

4.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se observa que, si el sistema regula el pH cada 30 minutos (Semana 1), se obtiene un comportamiento más estable de esta variable (Figura 4.3a); en comparación de un período de 60 minutos (Semana 2), que resulta en una

serie de sobre impulsos que no tienden a un valor fijo (Figura 4.3a). A pesar de estas variaciones presentes en la segunda semana, el valor de pH promedio se mantuvo en el rango óptimo recomendado (5.5-6).

El suministrar agua para compensar las pérdidas del tanque implica un pico en el pH de la solución de nutrientes que toma aproximadamente 80 minutos en restablecerse. Por esta razón, se puede determinar que el primer ciclo de regulación (30 minutos) es el más efectivo para el sistema; esto con el fin de evitar fluctuaciones adicionales en esta variable.

Para el primer grupo de plántulas (Semana 1) se empleó agua de la llave para llenar el tanque del sistema. Al mezclarse con la dosis recomendada de nutrientes (por el fabricante) se alcanzan valores cercanos a 5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4.3b); más de 4 veces el rango óptimo recomendado para cultivar lechugas (400 – 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Este valor excesivo de C.E. produjo que las raíces de las plantas se pudrieran, generando una mucosa que evita una oxigenación adecuada resultando en la muerte paulatina de la planta.

Debido al alto contenido de sales disueltas, para el segundo grupo de plántulas se utilizó agua embotellada de la marca Bonafont en lugar de agua de la llave. Durante los primeros días de la Semana 2, se redujo la C.E. a valores por debajo de 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4.3b). Agregar agua nueva al tanque también afecta el valor de esta variable; que supera progresivamente el rango óptimo recomendado. Por tal motivo, para el resto de la semana se usó la marca de agua embotellada Epura (que contiene menos sodio) con el objeto de reducir significativamente la C.E. a valores que no sobrepasan 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4.3b).

A partir de esta información, se establece que la marca Epura es la mejor opción para llenar el tanque del sistema para controlar la variable de C.E. de forma más efectiva. Esta consideración permitió que las raíces crecieran de forma saludable resultando en un incremento considerable en el tamaño de las hojas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIÓN

El principio de un sistema hidropónico consiste en mantener y controlar los parámetros ambientales y el suministro eficiente de nutrientes y agua para lograr un crecimiento saludable de las plantas. En este trabajo, se presentó el desarrollo de un cultivo hidropónico vertical con un sistema de control y monitoreo automatizado que utiliza tecnología IoT para recolectar y enviar información a una plataforma web. Este sitio funge como interfaz de usuario y genera representaciones gráficas que son fáciles de interpretar. Esta característica resulta conveniente ya que permite supervisar el sistema de forma rápida y remota.

Como se observó en la primera etapa de la investigación, recobra mucha importancia conocer e inspeccionar los parámetros de funcionamiento necesarios para evitar deficiencias en el cultivo. Se demostró que, de no seguir los valores recomendados de pH y C.E., las raíces de las plantas se ven afectadas impidiendo su sano desarrollo. Una vez identificadas las condiciones óptimas de la solución de nutrientes, las pruebas, los análisis y los resultados experimentales establecieron que el sistema desarrollado es una solución confiable para mantener el pH y la C.E. dentro de los rangos establecidos, lo que da como resultado una producción idónea. Además, se plantea como una alternativa viable para sustituir el control manual de un sistema hidropónico.

5.1 LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tanto el comportamiento del electrodo de pH como el de C.E., siguen relaciones matemáticas que están en función de la temperatura del líquido medido (Press, 2021a, 2021b). Esto implica que, con variaciones en la tem-

peratura en el tanque del sistema, se introducen errores significativos en la lectura de las sondas. Estas alteraciones se pueden contrarrestar si se instala un sensor de temperatura que monitoree esta variable. Con esta información disponible, los circuitos de medición son capaces de compensar de forma automática los valores registrados. De esta manera, se conseguiría una mayor precisión en el proceso de monitoreo y por ende un mejor control del cultivo.

El oxígeno disuelto (O.D.) en el agua es un parámetro crítico en los cultivos hidropónicos. Se requiere O.D. para la respiración de la planta, lo que influye en la absorción de nutrientes. El O.D. también es importante para la salud de las raíces, ya que los niveles bajos de oxígeno favorecen a los organismos anaeróbicos dañinos que causan la pudrición de estas. A su vez, los niveles suficientes de O.D. promueven un ambiente aeróbico que favorece a los microorganismos beneficiosos (High Volume Oxygen, 2021). Una propuesta de mejora importante para el sistema desarrollado es la integración de una sonda de O.D. para monitorear esta variable y con ello controlarla a través de un actuador como una bomba de aire. Con ello se podría optimizar en mayor medida el desarrollo de las plantas.

B I B L I O G R A F Í A

- Anpo, M., Fukuda, H. & Wada, T. (2018). *Plant Factory Using Artificial Light: Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation.* Elsevier.
- Azimi, F. H., Aw, S. R., Aris, R. S. N. A. R., Syafie, L. S., Fikri, K. I. & Shafie, W. R. W. (2020). IOT monitoring in NFT hydroponic system using blynk- an android platform. *International Journal of Synergy in Engineering and Technology*, 1(1), 1-10.
- Bluelab. (2020, marzo). *Grow Book*. Bluelab. <https://resources.bluelab.com/growbook>
- Chowdhury, M. E. H., Khandakar, A., Ahmed, S., Al-Khuzaei, F., Hamdalla, J., Haque, F., Reaz, M. B. I., Al Shafei, A. & Al-Emadi, N. (2020). Design, Construction and Testing of IoT Based Automated Indoor Vertical Hydroponics Farming Test-Bed in Qatar. *Sensors*, 20(19). <https://doi.org/10.3390/s20195637>
- Ciri, P. (2021, 16 de septiembre). *Vertical Hydroponics*. Consultado el 14 de noviembre de 2021, desde <https://bioslighting.com/horticulture-lighting/vertical-hydroponics/>
- Dudwadkar, A., Das, T., Suryawanshi, S., Dolas, R. & Kothawade, T. (2020). Automated Hydroponics with Remote Monitoring and Control Using IoT. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(6), 928-932.
- Esa, M., Bakar, M. A., Abas, P. E. P., Silva, L. D. & Metali, F. (2018). IoTs Hydroponics System: Effect of light condition towards plant growth. *Proceedings of the The 1st International Conference on Computer Science and Engineering Technology Universitas Muria Kudus*, 342-349. <https://doi.org/10.4108/eai.24-10-2018.2280609>
- Herman, Adidrana, D., Surantha, N. & Suharjito, S. (2019). Hydroponic Nutrient Control System Based on Internet of Things. *CommIT (Communication and Information Technology) Journal*, 13(2), 105-111. <https://doi.org/10.21512/commit.v13i2.6016>
- Herman & Surantha, N. (2020). SMART HYDROCULTURE CONTROL SYSTEM BASED ON IOT AND FUZZY LOGIC. *International Journal of*

- Innovative Computing, Information and Control*, 16(1), 207-221. <https://doi.org/10.24507/ijicic.16.01.207>
- High Volume Oxygen. (2021, 21 de junio). *Dissolved Oxygen for Horticulture*. Consultado el 15 de noviembre de 2021, desde <https://highvolumeoxygen.com/markets/horticulture/>
- Keim, R. (2019, 25 de marzo). *What Is a Microcontroller? The Defining Characteristics and Architecture of a Common Component - Technical Articles*. Consultado el 4 de octubre de 2021, desde <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/what-is-a-microcontroller-introduction-component-characteristics-component/>
- Lukito, R. B. & Lukito, C. (2018). Development of IoT at hydroponic system using raspberry Pi. *TELKOMNIKA*, 17(2), 897-906. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v17i2.9265>
- Marques, G., Aleixo, D. & Pitarma, R. (2019). Enhanced Hydroponic Agriculture Environmental Monitoring: An Internet of Things Approach. *Lecture Notes in Computer Science*, 11538, 658-669. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22744-9_51
- Mason, J. (2011). *Commercial Hydroponics* (3.^a ed.). ACS Distance Education.
- Mason, J. (2018). *Nutrients for Hydroponics and Tissue Culture*. ACS Distance Education.
- Mehra, M., Saxena, S., Sankaranarayanan, S., Tom, R. J. & Veeramanikandan, M. (2018). IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 473-486. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.015>
- Mody, A. & Mathew, R. (2019). AgroFarming - An IoT Based Approach for Smart Hydroponic Farming. *Proceeding of the International Conference on Computer Networks, Big Data and IoT (ICCBBI - 2019)*, 49, 348-355. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43192-1_40
- Mohammed, S. (2018). *Tomorrow's Agriculture: Nft Hydroponics - Grow Within Your Budget*. Springer.
- Nurhasan, U., Prasetyo, A., Lazuardi, G., Rohadi, E. & Pradibta, H. (2018). Implementation IoT in System Monitoring Hydroponic Plant Water Circulation and Control. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(44), 122-126.
- Palande, V., Zaheer, A. & George, K. (2018). Fully Automated Hydroponic System for Indoor Plant Growth. *Procedia Computer Science*, 129, 482-488. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.03.028>
- Patil, N., Patil, S., Uttekar, A. & Suryawanshi, A. R. (2020). Monitoring of Hydroponics System using IoT Technology. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(6), 1455-1458.
- Press, J. (2020, marzo). *EZO-PMP™ Datasheet*. Atlas Scientific. https://files.atlas-scientific.com/EZO_PMP_Datasheet.pdf
- Press, J. (2021a, enero). *EZO™ Conductivity Circuit Datasheet*. Atlas Scientific. https://files.atlas-scientific.com/pH_EZO_Datasheet.pdf
- Press, J. (2021b, enero). *EZO™ pH Circuit Datasheet*. Atlas Scientific. https://files.atlas-scientific.com/pH_EZO_Datasheet.pdf

- Rembor, K. (2020, 4 de noviembre). *Adafruit Metro ESP32-S2*. Consultado el 14 de noviembre de 2021, desde <https://learn.adafruit.com/adafruit-metro-esp32-s2>
- Siddiq, A., Tariq, M. O., Zehra, A. & Malik, S. (2020). ACHPA: A sensor based system for automatic environmental control in hydroponics. *Food Science and Technology*, 40(3), 671-680. <https://doi.org/10.1590/fst.13319>
- Torres, D. (2019, 19 de enero). *Hydroponics: The Art of Growing Plants Without Soil – Revista Landuum*. Consultado el 17 de noviembre de 2021, desde <https://www.landuum.com/en/history-and-culture/hydroponics-the-art-of-growing-plants-without-soil/>
- Ullah, A., Aktar, S., Sutar, N., Kabir, R. & Hossain, A. (2019). Cost Effective Smart Hydroponic Monitoring and Controlling System Using IoT. *Intelligent Control and Automation*, 10(4), 142-154. <https://doi.org/10.4236/ica.2019.104010>