

Carlos Alberto Torres Plazas

Asesor

Amaimen Guillén Pacheco, PhD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia -UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Electrónica

2026

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a los docentes de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD); en especial al Ingeniero Jairo Luis Gutiérrez Torres y al Ingeniero Amaimen

Amador Guillén Pacheco, quienes, con sus valiosos conocimientos, orientación y acompañamiento, aportaron significativamente a mi crecimiento académico y profesional, fortaleciendo mis competencias y contribuyendo al adecuado desarrollo de este proyecto.

A mi familia, quienes fueron pilares fundamentales que me permitieron afrontar con compromiso y responsabilidad cada uno de los retos presentados durante este proceso y continuar avanzando, siendo además una fuente constante de motivación e inspiración.

De igual manera, agradezco a todas las personas que brindaron su asesoría, compartieron su experiencia y facilitaron la información necesaria para el análisis, diseño e implementación del presente proyecto.

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado a Dios y a mi familia, por su amor incondicional, su paciencia y su apoyo constante en cada etapa de este proceso. Su motivación permanente fue un pilar fundamental que me impulsó a seguir adelante, incluso en los momentos más complejos. Gracias a su respaldo, fue posible superar los retos y las exigencias que implicó el desarrollo de este proyecto, constituyéndose en la base que sostuvo cada logro alcanzado.

Este documento describe el diseño, simulación e implementación de un sistema hidropónico automatizado para el cultivo de lechuga en un entorno controlado, integrando tecnologías de automatización electrónica, monitoreo ambiental y control de variables nutricionales. Se empleó una placa Arduino Leonardo como unidad central de control, encargada de gestionar sensores y actuadores asociados al riego y suministro de la solución nutritiva.

El sistema incorporó sensores para medir pH, sólidos disueltos totales (TDS), temperatura ambiente y calidad del aire, además de una pantalla LCD con comunicación I2C que permitió la supervisión en tiempo real de estos parámetros. Para el accionamiento hidráulico se integró una bomba sumergible de 12 VDC y una electroválvula NC de 12 VDC, controladas mediante módulos relés de 5V, garantizando un aislamiento eléctrico. Asimismo, se instalaron dos sensores de nivel tipo flotador para evitar reboses durante el proceso de recirculación.

La metodología fue de enfoque experimental y descriptivo, apoyada en simuladores como Tinkercad para validar el funcionamiento previo a la implementación física. Las mediciones periódicas permitieron analizar la estabilidad del sistema mediante indicadores estadísticos como el promedio, lo cual permitió establecer los rangos óptimos de operación del sistema: pH entre 5.5 y 6.5, TDS entre 700 y 1150 ppm, temperatura entre 18 °C y 24 °C y calidad del aire “Buena” según el AQI. En las gráficas de tendencia obtenidas se evidenció un comportamiento estable de las variables monitoreadas y una respuesta adecuada del sistema.

Como resultado se evidenció que la automatización permitió un uso eficiente del agua, redujo la intervención manual y evitó errores como el sobrellenado o el riego excesivo. El sistema hidropónico fue funcional y viable para el monitoreo y control de variables ambientales

y nutricionales, constituyéndose como una alternativa adecuada para la agricultura sostenible en⁵ espacios urbanos reducidos, como apartamentos.

Palabras clave: sistema hidropónico automatizado, cultivo de lechuga, arduino leonardo, monitoreo ambiental, control de variables nutricionales, sensores electrónicos.

This document describes the design, simulation, and implementation of an automated hydroponic system for lettuce cultivation in a controlled environment, integrating electronic automation technologies, environmental monitoring, and control of nutritional variables. An Arduino Leonardo board was used as the central control unit, responsible for managing sensors and actuators associated with irrigation and the supply of the nutrient solution.

The system incorporated sensors to measure pH, total dissolved solids (TDS), ambient temperature, and air quality, as well as an LCD display with I2C communication that enabled real-time monitoring of these parameters. For hydraulic actuation, a 12 VDC submersible pump and a 12 VDC normally closed (NC) solenoid valve were integrated, controlled through 5 V relay modules to ensure electrical isolation. In addition, two float-type level sensors were installed to prevent overflows during the recirculation process.

The methodology followed an experimental and descriptive approach, supported by simulators such as Tinkercad to validate system operation prior to physical implementation. Periodic measurements made it possible to analyze system stability using statistical indicators such as the mean, allowing the establishment of optimal operating ranges: pH between 5.5 and 6.5, TDS between 700 and 1150 ppm, temperature between 18 °C and 24 °C, and air quality classified as “Good” according to the AQI. The trend graphs obtained showed stable behavior of the monitored variables and an appropriate response in the collected data.

As a result, it was demonstrated that automation enabled efficient water use, reduced manual intervention, and prevented errors such as overfilling or excessive irrigation. The hydroponic system proved to be functional and viable for monitoring and controlling environmental and

nutritional variables, constituting an appropriate alternative for sustainable agriculture in limited urban spaces, such as apartments.

7

Keywords: automated hydroponic system, lettuce cultivation, arduino leonardo, environmental monitoring, nutritional variable control, electronic sensors.

Tabla de contenido

8

Introducción	14
Planteamiento del Problema	16
Justificación	20
Objetivos	22
Objetivo General	22
Objetivos Específicos.....	22
Marco conceptual.....	23
Agricultura Hidropónica	23
Automatización Agrícola	23
Agricultura Urbana	24
Cambio Climático y Agricultura.....	24
Inseguridad Alimentaria.....	25
Estado del Arte.....	26
Metodología	29
Materiales.....	29
Resultados	34
Fase 1: Plantas, Solución Nutritiva Requerida y Estructura	34
Fase 2: Armado de Estructura.....	37
Suministro de agua y recirculación de la misma	45
Fase 3: Simulaciones en Tinkercad.....	51
Simulación Sensor de pH.....	51
Simulación sensor de calidad del aire	54

Simulación Sensor de TDS	599
Simulación Sensor de Temperatura	62
Simulación - Diseño Físico del Cultivo Hidropónico en Interiores.....	65
Fase 4: Calibración de sensores físicos.....	67
Sensor de pH de 0-14.....	67
Calibración de Sensor de Aire MQ135.....	72
Calibración de Sensor de TDS.....	74
Calibración de Sensor de Temperatura DHT11	76
Fase 5: Integración de código y montaje electrónico.....	79
Funcionamiento del Sistema.....	79
Montaje Electrónico.....	92
Fase 6: Seguimiento del Crecimiento de la Lechuga (Lactuca Sativa L.)	95
Semana 1	95
Semana 2.....	99
Semana 3.....	99
Semana 4.....	100
Análisis de Resultados	102
Variables Analizadas	102
Gráficas de Tendencia Descriptivas.....	103
Conclusiones.....	110
Trabajo a Futuro.....	112
Referencias Bibliográficas	113

Lista de tablas

10

Tabla 1 *Materiales y Herramientas* 29

Tabla 2 *Verificación de las Plantas* 34

Tabla 3 *Rangos de las Variables Para el Cultivo Hidropónico* 102

Tabla 4 *Registro del Promedio de las Mediciones* 102

Lista de figuras

11

Figura 1 <i>Solución Nutritiva A y B</i>	36
Figura 2 <i>Reguladores de pH</i>	37
Figura 3 <i>Estructura en Madera y PVC</i>	37
Figura 4 <i>Inclinación de 15° Para Soportes</i>	38
Figura 5 <i>Soportes Laterales y Abrazaderas Metálicas</i>	39
Figura 6 <i>Medidas Soportes Verticales</i>	40
Figura 7 <i>Medidas, Soportes y Tubería</i>	40
Figura 8 <i>Instalación de Tubería en Soporte</i>	41
Figura 9 <i>Apertura de Huecos con Sierra Copa y Taladro</i>	42
Figura 10 <i>Lijado de Orificio con Lija #400</i>	42
Figura 11 <i>Instalación de Tubería con Orificios y Sujeción a Soporte</i>	43
Figura 12 <i>Componentes de PVC</i>	44
Figura 13 <i>Unión de PVC y Manguera de ½”</i>	44
Figura 14 <i>Electroválvula de 12 VDC</i>	45
Figura 15 <i>Contenedor - Salida e Ingreso de Nutrientes</i>	46
Figura 16 <i>Retorno de Agua al Accionarse Electroválvula</i>	46
Figura 17 <i>Rele Octoacoplado 4 Canales de 5VDC</i>	47
Figura 18 <i>Bomba Sumergible</i>	47
Figura 19 <i>Manguera Transparente en Soporte</i>	48
Figura 20 <i>Flotador y Regleta de Conexión</i>	49
Figura 21 <i>Sensores de Nivel Vertical</i>	49
Figura 22 <i>Vista Lateral Flotador</i>	50

Figura 23	<i>Tubería Final Para el Retorno de la Solución Nutritiva</i>	5012
Figura 24	<i>Manguera Transparente</i>	51
Figura 25	<i>Simulación de Sensor de pH</i>	52
Figura 26	<i>Simulación de Sensor Calidad del Aire</i>	55
Figura 27	<i>Simulación de Sensor TDS</i>	60
Figura 28	<i>Simulación de Sensor de Temperatura</i>	63
Figura 29	<i>Simulación del Entorno en Tinkercad</i>	66
Figura 30	<i>Distribución de Elementos y Componentes para Montaje</i>	66
Figura 31	<i>Calibración Sensor de pH</i>	67
Figura 32	<i>Buffer o Solución de 4ph y 7ph</i>	67
Figura 33	<i>Cortocircuitar el Módulo del Sensor pH</i>	68
Figura 34	<i>Calibración del Sensor de pH con Buffer de ph 7,0</i>	69
Figura 35	<i>Resultado Después de la Calibración I</i>	69
Figura 36	<i>Verificación Agua de Grifo</i>	70
Figura 37	<i>Calibración del Sensor de pH con Buffer de ph 4,0</i>	71
Figura 38	<i>Resultado Después de la Calibración II</i>	71
Figura 39	<i>Sensor MQ135</i>	72
Figura 40	<i>Calibración Sensor MQ135</i>	73
Figura 41	<i>Sensor de Solidos Disueltos Totales - TDS</i>	75
Figura 42	<i>Calibración del TDS</i>	76
Figura 43	<i>Sensor DHT11</i>	76
Figura 44	<i>Lectura Sensor DHT11</i>	78
Figura 45	<i>Hardware del Proyecto</i>	92

Figura 46	<i>Visualización de los Parámetros en la Pantalla LCD</i>	9313
Figura 47	<i>Parámetros Medidos de los Sensores I</i>	94
Figura 48	<i>Parámetros Medidos de los Sensores II</i>	94
Figura 49	<i>Plántulas de Lactuca Sativa L.</i>	95
Figura 50	<i>Reguladores Para Estabilizar el pH</i>	96
Figura 51	<i>Componentes de la Solución Nutritiva A y B</i>	96
Figura 52	<i>Preparación de la Solución Nutritiva</i>	97
Figura 53	<i>Adaptación de las Plántulas en el Cultivo</i>	98
Figura 54	<i>Disposición del Cultivo</i>	99
Figura 55	<i>Crecimiento al Finalizar la Tercera Semana</i>	100
Figura 56	<i>Crecimiento al Finalizar la Cuarta Semana</i>	101
Figura 57	<i>Monitoreo de pH</i>	103
Figura 58	<i>Monitoreo de Temperatura</i>	103
Figura 59	<i>Monitoreo Calidad del Aire</i>	104
Figura 60	<i>Clasificación de la Calidad del Aire - AQI</i>	104
Figura 61	<i>Monitoreo de TDS</i>	105

El Gobierno Nacional reconoce en Colombia su vulnerabilidad a los efectos del cambio climático, lo cual, según estimaciones, requiere cerca de 7 billones de pesos anuales para fortalecer las medidas climáticas según el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2023). Es por esto que la ministra del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Susana Muhamad, tomó medidas urgentes ante los efectos del cambio climático, debido al aumento de la temperatura que amenaza la seguridad alimentaria, por lo cual fue priorizada la acción climática en el Plan Nacional de Desarrollo (MINAMBIENTE, 2023).

En el Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) se confirmó este fenómeno, y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) investigó sus impactos en el país, proyectándose un aumento en la temperatura media del aire en Colombia debido a la polución causada por la actividad industrial y el transporte, que emiten más de 4 mil toneladas de contaminantes al año lo cual, sumado a la gestión inadecuada de los recursos naturales propició la degradación del suelo; el 45% de los suelos tiene usos diferentes a su capacidad natural y los cultivos intensivos agotaron los nutrientes del suelo al no tener el tiempo necesario para recuperarse (IDEAM 2015).

Aunado a lo anterior, el Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas en Colombia (World Food Programme - WFP), confirmó que la inseguridad alimentaria a nivel nacional es del 30% según los resultados de esta evaluación realizada entre agosto y noviembre de 2022; es decir, aproximadamente 15.5 millones de personas afectadas. Entre las causas relacionadas se encuentra las dificultades en el acceso a la tierra, el cambio climático, el aumento en los precios de los alimentos y la falta de empleo formal (WFP, 2023).

Por lo anterior, se diseña y desarrolla un sistema de agricultura hidropónica vertical 15 automatizado, adaptado a espacios habitacionales urbanos cerrados (apartamentos), que integre sensores electrónicos para el monitoreo y control de los parámetros necesarios para el óptimo desarrollo de las plantas (lechugas), con el fin de optimizar el uso de recursos no renovables, contribuir a la mitigación del cambio climático en entornos urbanos y a la seguridad alimentaria mediante la producción de alimentos frescos.

En la actualidad, Colombia enfrenta de manera simultánea dos problemáticas estructurales que impactan directamente la calidad de vida de su población: el cambio climático y la inseguridad alimentaria. Estas situaciones se han visto intensificadas por la degradación del suelo, la variabilidad climática y el crecimiento acelerado de los centros urbanos; factores que limitan la producción agrícola tradicional y el acceso equitativo a alimentos frescos y nutritivos.

Esta realidad afecta principalmente a la población colombiana que reside en entornos urbanos, donde el acceso a tierras cultivables es reducido y la dependencia de los sistemas de abastecimiento externos es elevada. De acuerdo con el Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas, alrededor de 15,5 millones de personas en el país presentan algún grado de inseguridad alimentaria, situación que se agrava en las ciudades debido al incremento del costo de los alimentos y a la vulnerabilidad de los sistemas de distribución. Paralelamente, los efectos del cambio climático se manifiestan con mayor intensidad en las zonas urbanas, evidenciándose en alteraciones significativas de la temperatura y los regímenes de lluvias, así como en el aumento de la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos asociados a los fenómenos de El Niño y La Niña (WFP, 2023).

Si bien estas problemáticas se presentan a nivel nacional, su impacto es particularmente importante en ciudades como Bogotá, donde la presión sobre los recursos naturales, la contaminación atmosférica y la limitada disponibilidad de suelo agrícola incrementan los riesgos asociados a la seguridad hídrica y alimentaria. En este contexto, el IDEAM ha advertido que la variabilidad climática compromete el desarrollo sostenible de la ciudad, haciendo necesario adoptar estrategias innovadoras que permitan mitigar sus efectos (Concejo de Bogotá, 2022).

Cabe destacar que la inseguridad alimentaria y los impactos del cambio climático no 17 constituyen fenómenos aislados ni temporales, sino que se presentan de manera crónica y progresiva. No obstante, su urgencia ha aumentado en los últimos años como consecuencia del incremento sostenido de las temperaturas, la degradación de los suelos y la disminución de la capacidad productiva de los sistemas agrícolas convencionales (Munar, L., 2023).

El origen de esta problemática se encuentra estrechamente relacionado con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), derivados principalmente de la quema de combustibles fósiles, la deforestación, la agricultura intensiva y las actividades industriales. Estos gases contribuyen al calentamiento global y a la alteración de los patrones climáticos, efectos que se intensifican en las ciudades debido a la escasa cobertura vegetal. En este sentido, Colombia aporta aproximadamente el 0,57 % de las emisiones globales de CO₂ equivalente, mientras que Bogotá concentra el 5,37 % de las emisiones nacionales, alcanzando cerca de 236 millones de toneladas de CO₂eq por año, lo que representa un promedio aproximado de 1,76 toneladas por habitante al año. Esta situación proyecta una afectación directa sobre la producción agrícola tradicional, especialmente en contextos urbanos (MINAMBIENTE, 2023).

Adicionalmente, el IDEAM prevé un aumento gradual de la temperatura media anual en Bogotá para el período 2071–2100, con incrementos estimados entre 1,2 °C y 1,6 °C en gran parte de la ciudad. Asimismo, se proyectan cambios significativos en el comportamiento de las precipitaciones para los periodos 2040, 2070 y 2100; evidenciándose una disminución de las lluvias entre el 10 % y el 20 % en la zona oriental y un aumento de entre el 20 % y el 30 % en la zona occidental, lo cual podría generar desequilibrios en la disponibilidad hídrica y en los sistemas productivos urbanos (IDEAM, 2015).

Por otro lado, la inseguridad alimentaria se manifiesta a través de diversos indicadores 18 que evidencian la magnitud de esta problemática en la ciudad de Bogotá. En este sentido, de acuerdo con los datos reportados por el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, el 19% de la población de la ciudad se encuentra afectada por inseguridad alimentaria, lo que equivale a aproximadamente 1.529.977 personas en esta condición. De manera complementaria, durante el año 2022 se registraron 4.089 casos de niños con desnutrición aguda, lo que refleja una situación particularmente crítica en la población infantil (Infobae, 2023).

Asimismo, la inseguridad alimentaria se encuentra estrechamente relacionada con las condiciones de pobreza, dado que el 5 % de los hogares en Bogotá vive en situación de pobreza extrema y el 34 % de la población se encontraba en condición de pobreza monetaria para el año 2021. En concordancia con lo anterior, el 25,4 % de los hogares reportó que sus ingresos no son suficientes para cubrir los gastos mínimos, mientras que el 52,8 % indicó que únicamente logra cubrir dichos gastos, lo que limita significativamente el acceso a una alimentación adecuada y balanceada.(Infobae, 2023)

Adicionalmente, el comportamiento del mercado de alimentos representa un factor determinante en la inseguridad alimentaria urbana, ya que en abril de 2023 el abastecimiento per cápita de alimentos en la ciudad fue de 21,7 kilogramos por habitante y el 53,6 % de los alimentos monitoreados presentó una tendencia al alza en sus precios, situación que reduce la capacidad adquisitiva de los hogares más vulnerables. (Infobae, 2023)

Frente a este escenario, se han implementado diversas estrategias institucionales para mitigar los efectos de la inseguridad alimentaria; no obstante, estas resultan insuficientes para cubrir la totalidad de la población afectada. Durante el primer trimestre de 2023, el Programa de Alimentación Escolar benefició al 100% de las Instituciones Educativas Distritales, contando con

193 comedores escolares operativos. De igual forma, se habilitaron 33.120 cupos para la atención de población en inseguridad alimentaria a través de 112 comedores comunitarios, se beneficiaron 16.261 personas mediante bonos canjeables por alimentos y se atendieron 46.686 personas mediante el suministro de alimentos crudos en 350 unidades operativas en marzo de 2023. (Infobae, 2023) Finalmente, como parte de las estrategias de acceso a alimentos frescos, se desarrollaron 1.253 mercados campesinos en la ciudad, los cuales contribuyen al fortalecimiento del abastecimiento local (Infobae, 2023). 19

Teniendo en cuenta que los cultivos hidropónicos se presentan como una solución más para la lucha contra el cambio climático y la sostenibilidad alimentaria, se hace necesario incluir en su implementación, la aplicación y uso de la ingeniería electrónica para facilitar y permitir su correcto desarrollo, al tener un monitoreo y control en tiempo real sobre su desarrollo de una manera muy simple, ofreciéndole a las personas beneficios ambientales y en su salud, al reducir el consumo de recursos naturales, especialmente del agua la cual se puede reciclar y reutilizar hasta un porcentaje estimado 90% (Colombia Verde, 2026), en comparación con la agricultura tradicional. Además, al prescindir en gran medida de la tierra y utilizar soluciones enriquecidas con nutrientes, se reduce el uso de fertilizantes y pesticidas, disminuyendo la huella ambiental.

La adopción de cultivos hidropónicos automatizados también puede ayudar a mitigar los efectos del cambio climático al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y aliviar la presión en hábitats naturales (SINC, 2023; García, K. 2022). Asimismo, la eficiencia en la producción de alimentos y la posibilidad de poder obtenerlos durante todo el año es otro aspecto importante en los sistemas hidropónicos automatizados, además, se pueden cultivar en espacios reducidos con modelos verticales, ayudando a la seguridad alimentaria y reduciendo la expansión de la agricultura hacia áreas silvestres, conservando la biodiversidad y los ecosistemas naturales (Groots, 2022).

De igual manera, favorece una autosuficiencia alimentaria, y reduce las emisiones asociadas con el transporte de alimentos. La agricultura vertical automatizada también ofrece un control más directo sobre la producción, al no depender de condiciones meteorológicas externas y permite un uso más eficiente del agua. Al prescindir del uso de pesticidas y otros insumos químicos, se considera más respetuosa con el medio ambiente y más saludable para la sociedad.

Por otro lado, ofrece una amplia variedad de cultivos, desde hierbas aromáticas hasta 21 cultivos como bayas, fresas y tomates. Este sistema de cultivo también tiene un impacto social positivo al generar una autosuficiencia y proporcionar oportunidades a personas en riesgo de exclusión social (González, M. 2021).

Objetivo General

Desarrollar un sistema electrónico automatizado para cultivos hidropónicos verticales en espacios urbanos reducidos, optimizando la producción de alimentos como medida de mitigación ante la inseguridad alimentaria y el cambio climático.

Objetivos Específicos

Investigar sobre un sistema electrónico que incluya diversos sensores conectados a un circuito lógico programable que permitan su control y monitoreo en tiempo real.

Diseñar un sistema electrónico automatizado para cultivos hidropónicos verticales, que optimice su proceso para la producción que integre principios de electrónica aplicada en el proyecto.

Construir un prototipo funcional de cultivo hidropónico vertical automatizado, integrando dispositivos electrónicos para su monitoreo y control.

Analizar el desempeño del sistema automatizado y su eficiencia en el uso de recursos, verificando la respuesta del control electrónico para determinar la factibilidad técnica y operativa de la solución propuesta.

El presente proyecto se fundamenta en los siguientes conceptos claves para la implementación y desarrollo del cultivo hidropónico automatizado.

Agricultura Hidropónica

Es un sistema de cultivo de plantas que se realiza sin suelo, donde las raíces de las plantas se sumergen o se exponen a una solución nutritiva equilibrada. Este método permite que las plantas absorban directamente los nutrientes que necesitan para su desarrollo, eliminando la necesidad de obtenerlos a través del suelo. Favorece el uso más eficiente del agua al reducir significativamente su desperdicio, ya que esta se aprovecha o recircula adecuadamente a través de su sistema; además, los nutrientes al estar disueltos en agua están fácilmente disponibles para las plantas, lo que promueve un crecimiento más rápido y saludable. En este tipo de cultivo se proporciona un monitoreo más preciso de las condiciones de crecimiento de las plantas al controlar los factores que inciden en ella como pH, temperatura, nutrientes, entre otros (Valenzuela, 2019).

Automatización Agrícola

La automatización agrícola implica integrar el uso de tecnología y sistemas de control para realizar tareas agrícolas de manera autónoma o semiautónoma. Los componentes clave de la automatización agrícola incluyen sensores que recopilan datos ambientales; como temperatura, humedad del suelo y condiciones climáticas; así como actuadores que ejecutan acciones específicas, como el riego automatizado o la activación de sistemas de protección contra heladas. Del mismo modo, la regulación automatizada de la temperatura y la iluminación en invernaderos o cultivos bajo condiciones controladas permite crear ambientes ideales para el crecimiento de las plantas durante todo el año. Genera un impacto significativo en la productividad y la

rentabilidad de las explotaciones agrícolas al reducir los costos laborales y mejorar la eficiencia de los procesos (Figueroa, C. 2023).

24

Agricultura Urbana

La agricultura urbana se refiere a la práctica de cultivar alimentos dentro o en las proximidades de áreas urbanas, aprovechando espacios como terrazas, balcones, jardines comunitarios o parcelas de tierra en desuso. Esta práctica puede contribuir significativamente a la seguridad alimentaria local, al proporcionar acceso directo a productos frescos y saludables en entornos urbanos donde la disponibilidad de alimentos frescos puede ser limitada. Al cultivar alimentos localmente, se reduce la dependencia de la importación de alimentos y se ayuda a mitigar el cambio climático al reducir la huella de carbono, mejorando la calidad del aire en las ciudades; por otro lado, se fortalece la resiliencia de la comunidad ante posible interrupción en la cadena de suministro y se promueve un estilo de vida más sostenible (Ávila, H. 2019).

Cambio Climático y Agricultura

Representa uno de los mayores desafíos para la agricultura global, ya que sus efectos adversos pueden afectar de manera significativa la producción de alimentos, la disponibilidad de recursos hídricos y la estabilidad de los ecosistemas agrícolas en todo el mundo con una serie de cambios en los patrones climáticos y fenómenos meteorológicos extremos. El cambio climático afecta la agricultura de múltiples maneras, incluyendo cambios en los patrones de lluvia aumentando en su frecuencia y/o intensidad, ocasionando inundaciones o erosiones; el aumento de las temperaturas reduce el rendimiento de los cultivos, disminuye la calidad de los alimentos y aumenta la presión sobre los recursos hídricos disponibles. Igualmente, las olas de calor, las tormentas intensas y los huracanes, también están aumentando en frecuencia e intensidad debido al cambio climático, esto puede tener un impacto negativo en la producción de alimentos, la

disponibilidad de agua y la estabilidad de los ecosistemas agrícolas (González, E. & Meira, P.E, 2020). 25

Inseguridad Alimentaria

Se refiere a una condición en la que las personas enfrentan dificultades para obtener alimentos suficientes, seguros y nutritivos que les permitan llevar una vida saludable y activa. Esta situación puede manifestarse de diversas formas, desde la escasez crónica de alimentos hasta la incapacidad de acceder a una dieta variada y equilibrada debido a limitaciones económicas, sociales o políticas. Se puede destacar que la inseguridad alimentaria no solo afecta la disponibilidad física de alimentos, sino también su accesibilidad y adecuación; es decir, algunas personas pueden no poder pagarlos o pueden verse obligadas a recurrir a opciones alimentarias poco nutritivas o de mala calidad debido a limitaciones económicas. Además, la inseguridad alimentaria también puede estar relacionada con la contaminación de alimentos o la falta de acceso a agua potable para la preparación de alimentos (Piña, C. 2020).

El cultivo hidropónico se ha considerado en los últimos años como una alternativa eficiente y sostenible frente a la agricultura tradicional, especialmente en entornos urbanos e interiores donde el espacio y los recursos son limitados (Hidroponía Industrial, 2023). Esta técnica permite el crecimiento de las plantas sin suelo, utilizando soluciones nutritivas controladas que optimizan el uso del agua y los nutrientes, reduciendo el impacto ambiental y aumentando la productividad (Ciladi, 2024).

Diversos estudios y desarrollos tecnológicos han demostrado que la automatización de los sistemas hidropónicos mejora significativamente la estabilidad de las condiciones de cultivo, al permitir el monitoreo continuo de variables críticas como el pH, la temperatura, la concentración de nutrientes y la calidad del aire (P'unguari Juáta, 2025). La integración de sensores electrónicos y microcontroladores ha facilitado la implementación de sistemas de control accesibles, especialmente en contextos educativos y de investigación (UNMSM, 2025).

En el ámbito de la electrónica aplicada a la agricultura, plataformas basadas en Arduino se han posicionado como una de las soluciones más utilizadas para el desarrollo de sistemas de monitoreo y control en cultivos hidropónicos. Su costo accesible, facilidad de programación y amplia información de soporte han permitido la integración de sensores analógicos y digitales para la medición de parámetros ambientales y nutricionales (TEC, 2018). Entre los sensores más empleados se encuentran los sensores de pH, TDS, temperatura, humedad y gases, los cuales permiten evaluar en tiempo real las condiciones del cultivo (Ciladi, 2024).

La literatura coincide en que el control del pH y de los sólidos disueltos totales (TDS) es fundamental para garantizar una adecuada absorción de nutrientes en cultivos de hoja como la lechuga. Rangos de pH entre 5.5 y 6.5, así como concentraciones de TDS entre 700 y 1150 ppm,

han sido documentados como óptimos para este tipo de cultivos en sistemas hidropónicos 27 (Nutrihydro Plant Nutrients, 2026). La automatización de estas mediciones reduce el error humano y mejora la consistencia del sistema productivo.

Por otra parte, el monitoreo de la temperatura ambiente y la calidad del aire ha cobrado relevancia en sistemas de cultivo interior. Estudios previos señalan que temperaturas entre 18 °C y 24 °C favorecen el crecimiento de la lechuga, mientras que concentraciones moderadas de CO₂ mejoran el proceso de fotosíntesis sin generar estrés en las plantas (P'unguari Juáta, 2025). La inclusión de sensores de calidad de aire, como los basados en la familia MQ para Arduino, permite evaluar estas condiciones y ajustar la ventilación del sistema cuando es necesario (Luis llamas, 2026).

En contextos académicos, el uso de plataformas de simulación como Tinkercad Circuits se ha convertido en una herramienta clave para la enseñanza y validación de proyectos de automatización agrícola (UDES, 2022). Estas plataformas permiten simular el comportamiento de sensores, actuadores y microcontroladores, facilitando el análisis de datos y la detección temprana de errores antes de la implementación física del sistema. Este enfoque reduce costos y riesgos, al tiempo que fortalece el aprendizaje práctico de los estudiantes (UDES, 2022).

En relación con la visualización de datos, el uso de pantallas LCD con interfaz I2C es una solución comúnmente documentada en proyectos de monitoreo hidropónico, ya que permite mostrar de forma clara y sencilla las variables medidas en tiempo real. Asimismo, la incorporación de elementos de alerta y sistemas de control mediante relés contribuye a la seguridad y confiabilidad del sistema (TEC, 2018).

Por ende, se evidencia una tendencia creciente hacia la implementación de sistemas hidropónicos automatizados basados en microcontroladores, sensores electrónicos y plataformas

de simulación (UPS Ecuador, 2022). El proyecto desarrollado se enmarca dentro de estas 28 líneas de trabajo, integrando el monitoreo de pH, TDS, temperatura y calidad del aire en un sistema automatizado orientado al cultivo de lechuga en ambiente interior, alineándose con las prácticas y recomendaciones documentadas en la literatura técnica y académica (TEC, 2018).

Metodología

En el diseño y desarrollo del sistema de agricultura vertical hidropónica sostenible, automatizado y monitorizado, se empleó un enfoque principalmente práctico, utilizando los dispositivos tecnológicos requeridos, centrándose en la implementación efectiva del modelo para apoyar las problemáticas identificadas durante la fase inicial del proyecto. Por lo anterior, el diseño inicial incluyó la instalación y puesta en marcha del prototipo de agricultura vertical en un entorno urbano controlado, como un apartamento. Este diseño permitió realizar pruebas y ajustes en tiempo real, garantizando su desarrollo en condiciones previamente establecidas.

Se llevó a cabo una verificación de los datos recopilados durante las pruebas del sistema. Esto incluyó el cálculo de promedios y la evaluación de las variaciones en la información obtenida por medio de los sensores, asegurando la estabilidad con el monitoreo de los parámetros ambientales y del crecimiento de las plantas.

Finalmente, se realizó un análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas comparando los valores registrados por los sensores, así como la validación del rendimiento esperado del diseño para asegurar su eficacia y sostenibilidad.

Materiales

Tabla 1 *Materiales y Herramientas*

Material	Descripción	Función
Sensor analógico de pH 0–14	Sensor electroquímico con módulo	Permite medir la acidez de la solución nutritiva para controlar la disponibilidad de nutrientes del cultivo.

Material	Descripción	Función
Módulo relé 4 canales 5V	Módulo de potencia opto acoplado	Utilizado como interfaz entre Arduino y actuadores de 12 VDC, permitiendo el encendido y apagado seguro de la bomba y la electroválvula.
Bomba de agua 12 VDC – 240 L/h	Bomba sumergible	Responsable de la recirculación de la solución nutritiva en el sistema hidropónico. Controlada mediante relé.
Sensor de nivel de agua (flotador)	Interruptor mecánico vertical	Detecta niveles altos y bajos del agua para evitar reboses o funcionamiento en seco de la bomba.
Sensor de calidad de aire MQ-135	Sensor de gases	Permite estimar la calidad del aire y concentración de CO ₂ en el ambiente del cultivo interior.
Sensor DHT11	Sensor digital de temperatura y humedad	Mide condiciones ambientales que influyen directamente en el desarrollo de la lechuga.
Display LCD 16×2	Pantalla alfanumérica	Visualiza en tiempo real los valores de pH, temperatura, calidad del aire y TDS; al igual que el funcionamiento de la bomba sumergible.
Módulo I2C PCF8574	Adaptador de comunicación	Reduce el uso de pines del Arduino para el manejo del LCD mediante protocolo I2C,

Material	Descripción	Función
		permitiendo la conexión de otros componentes.
Electroválvula de 12 VDC de 1/2" NC	Válvula solenoide	Controla el paso de agua de forma automática según las condiciones del sistema.
Sensor TDS	Medidor de sólidos disueltos	Permite medir la concentración de nutrientes en la solución hidropónica (ppm).
Arduino Leonardo	Microcontrolador	Unidad central de procesamiento que adquiere datos, ejecuta el control y gestiona salidas.
Cable UTP	Cable de red	Utilizado para conexiones de señal y comunicación estructurada.
Cables jumper MH	Conductores de conexión	Facilitan la interconexión entre sensores, módulos y el Arduino.
Cables jumper HH	Conductores de conexión	Usados en conexiones entre módulos electrónicos.
Plántulas (lechugas)	Material biológico	Elemento productivo del sistema hidropónico.
Tubo sanitario 2"	Tubería PVC	Canaliza la solución nutritiva en el sistema NFT y sirve de soporte para las plantas.

Material	Descripción	Función
Tubo presión 1/2"	Tubería hidráulica	Conduce la solución nutritiva por gravedad.
Soldadura PVC	Adhesivo	Permite uniones herméticas en la estructura hidráulica.
Lija de agua #400	Herramienta manual	Prepara superficies de PVC antes del pegado.
Cinta teflón	Sellador	Evita fugas en conexiones roscadas.
Cable dúplex 2×14	Conductor eléctrico	Alimenta dispositivos de 12 VDC.
Regleta	Conexión eléctrica	Permite conectar el cableado eléctrico de los componentes.
Codo 90° 1/2"	Accesorio PVC	Permite cambios de dirección en la tubería.
Abrazadera metálica	Elemento de sujeción	Fija mangueras y tubos al sistema.
Caja Modubox	Contenedor plástico	Almacena solución nutritiva y protege componentes.
Unión sanitaria 2"	Accesorio PVC	Permite conexión de buje de 2" a 1/2" entre la tubería.
Buje PVC 2"×1/2"	Reductor	Adapta diámetros entre tuberías.
Adaptador hembra 1/2"	Conector	Permite acople de válvulas y mangueras.
Reducción 3/4" × 1/2"	Racor	Ajusta diámetros hidráulicos para la conexión con manguera de 1/2" de jardín.

Material	Descripción	Función
Manguera jardín 1/2"	Conducción flexible	Transporte de agua por gravedad entre los tubos de 2".
Metro	Herramienta de medición	Permite realizar mediciones en los materiales del cultivo hidropónico.
Abrazadera sin fin	Sujeción	Asegura mangueras de jardín a racores.
Listones de Pino 1"×2"	Madera estructural	Soporte físico del sistema hidropónico.
Cinta aislante	Aislante eléctrico	Protección y orden de conexiones.
Manguera cristal 8 mm	Conducción	Transporte de solución nutritiva.
Tornillos varios	Elementos de fijación	Ensamble estructural del sistema.
Bombillo LED cultivo	Iluminación artificial	Complemento a la luz natural para el desarrollo de la planta.
Nivel	Herramienta	Garantiza correcta inclinación del sistema.
Taladros	Herramientas eléctricas	Perforación y montaje estructural.
Martillo	Herramienta manual	Ensamble general.
Mesa de trabajo	Superficie	Área de montaje del sistema.
Guantes	EPP	Protección personal durante el montaje.

Nota. En esta tabla se muestra la descripción de los materiales y herramientas necesarias, al igual que la función que cumplen en el cultivo hidropónico

Fase 1: Plantas, Solución Nutritiva Requerida y Estructura

Se llevó a cabo una indagación sobre las plantas más viables para el cultivo hidropónico, presentando un cuadro comparativo que evidencia sus beneficios, como se muestra a continuación:

Tabla 2 *Verificación de las Plantas*

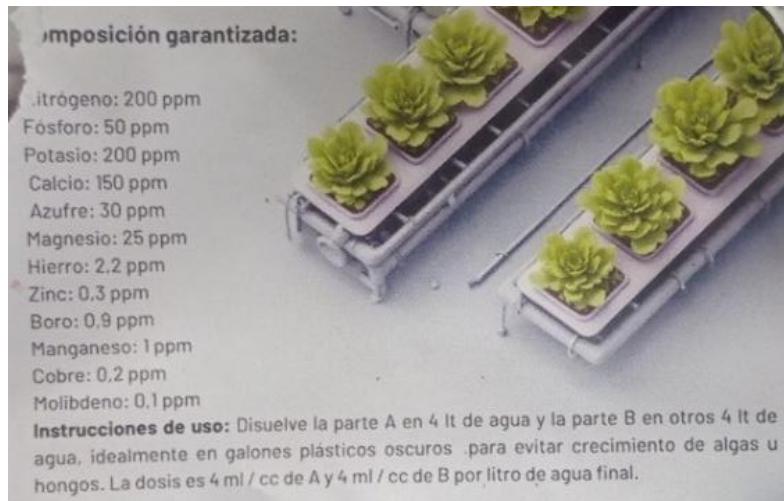
Planta	Tiempo estimado de desarrollo	Ventajas para hidroponía	Consideraciones mínimas
Lactuca sativa (lechuga)	25 a 40 días	Crecimiento rápido para consumo, responde favorablemente a sistemas compactos.	Buen nivel de luz, control de nutrientes y pH, temperatura moderada.
<i>Allium tuberosum</i> (cebollín chino / cebollín)	25 a 35 días	Hierba de hoja, planta aromática de uso común, se puede desarrollar en cultivos hidropónicos.	Requiere control de solución nutritiva para una condición de crecimiento óptimo.
<i>Spinacia oleracea</i> (espinaca)	Más de 35 días	Hojas verdes nutritivas, ciclo relativamente corto, de empleo comercial.	Asegurar buena concentración de nutrientes y manejo del sistema hidropónico.

Nota. En la tabla se observan las plantas evaluadas para el cultivo hidropónico.

El cuadro anterior no incluye todas las plantas consultadas, ya que para garantizar un desarrollo óptimo en el cultivo hidropónico automatizado se consideró principalmente el tiempo de crecimiento y la practicidad para su consumo en platos comunes, sencillos y nutritivos. Por esta razón, se optó por cultivar lechuga (*Lactuca sativa*). 35

No obstante, se recopiló información adicional sobre otras especies que también son aptas para hidroponía, entre las que se encuentran: cebollín (*Allium tuberosum*), albahaca (*Ocimum basilicum*), espinaca (*Spinacia oleracea*), kale / col rizada (*Brassica oleracea* var. sabellica), espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*), fresa (*Fragaria*), tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. cerasiforme), rúcula (*Eruca sativa*), menta (*Mentha spicata*) y perejil (*Petroselinum crispum*).

En lo referente al sustrato y los minerales requeridos para la planta seleccionada (Lechuga) se implementó un cultivo utilizando una solución nutritiva completa para hortalizas de hoja, es decir, un producto “todo en uno” que contenga macronutrientes (N, P, K) y secundarios/micronutrientes (Ca, Mg, S, Fe, Zn, Mn, B, Mo), para asegurar un desarrollo óptimo de las plantas y simplifica la dosificación. Por ejemplo, la bolsa “Nutrientes Hidropónicos Lechuga Sólido Kit 1000 Litros” de Hidroponía Industrial contiene todos los elementos mayores y menores necesarios para hojas, lo que facilita el manejo del cultivo y garantiza un equilibrio nutricional adecuado para hortalizas de hoja verde.

Solución Nutritiva A y B

Nota. La figura muestra los componentes de la composición de la solución nutritiva.

Además, es fundamental contar con un producto regulador de pH o solución de ajustes, ya que el pH óptimo para la lechuga se sitúa aproximadamente entre 5.5 y 6.5, rango en el cual se maximiza la absorción de nutrientes. Por lo cual, también se usó un regulador de pH líquido (para subir sería un pH - pH Up o bajar pH - pH Down), el cual se aplicó lentamente, mezclando bien la solución y volviendo a medir el pH después de unos minutos para asegurar que está en el rango adecuado. Se controló el pH a diario, ya que puede cambiar conforme las plantas absorben nutrientes, para mantener la estabilidad de la solución nutritiva y el correcto crecimiento de las plantas.

Figura 2

Reguladores de pH



Nota. En la figura se muestra los frascos adquiridos pH Down y pH Up

Fase 2: Armado de Estructura**Figura 3**

Estructura en Madera y PVC



Nota. En la imagen se muestra en ensamble de los soportes verticales y horizontales de los listones de pino.

En la imagen se observa la estructura física del sistema de cultivo hidropónico vertical, 38 diseñada para su instalación en entornos interiores, como viviendas o apartamentos, con el propósito de optimizar el uso del espacio disponible. La estructura principal está construida en madera de pino, utilizando listones de 2×1 pulgadas, los cuales conforman un soporte tipo bastidor inclinado que garantiza estabilidad mecánica y facilita la distribución vertical de los módulos de cultivo. La fijación de la estructura se efectuó mediante tornillos para madera de 1 y $1/2$ pulgadas y de 1 pulgada, complementados con adhesivo para madera (Colbón), lo que asegura una adecuada resistencia estructural y durabilidad del sistema.

Figura 4

Inclinación de 15° Para Soportes



Nota. En la figura se muestra la verificación de los diferentes ángulos de soporte, optándose por una inclinación de 15° .

Se valida que la inclinación requerida para ocupar un espacio reducido sea de 15° , lo que permitirá que la estructura ocupe un espacio de 53 cms de frente con respecto a la pared.

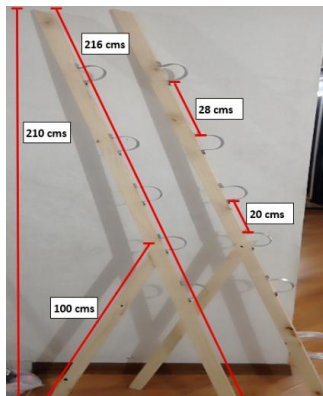
Soportes Laterales y Abrazaderas Metálicas

Nota. En la imagen se observa la unión de los soportes laterales y las abrazaderas metálicas de dos pulgadas.

Al soporte principal se une un apoyo adicional “pata” que permita dar más estabilidad al grado de inclinación. Posteriormente se realiza la división de los paralelos, estableciendo una distancia de mínimo 20 cms entre cada uno de los cinco tubos de PVC de 2”, dejando un espacio adicional de 8 cms entre el número 1 y el número 2 (contando de arriba hacia abajo), ya que en este debe quedar una caja que contendrá la pantalla LCD y sensores del Proyecto, como se muestra a continuación en la Figura 6 y 7:

Figura 6

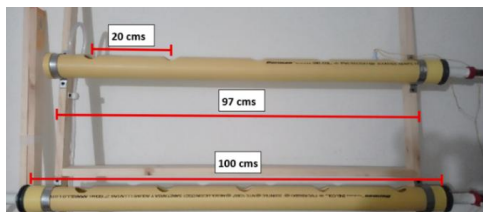
Medidas Soportes Verticales



Nota. En la figura se muestra las medidas de referencia sobre el largo de cada soporte lateral, e inclinado, al igual que la distancia entre cada abrazadera metálica.

Figura 7

Medidas, Soportes y Tubería



Nota. En la figura se muestra las medidas del largo de la tubería, y las distancias entre los orificios para almacenar las plantas.

Sobre la estructura de madera se instalaron tubos de PVC de 2 pulgadas x 1 metro, dispuestos de manera horizontal y equidistante, los cuales funcionan como canales de cultivo para las plantas. Estos tubos presentan perforaciones superiores destinadas a la ubicación de las plántulas y se encuentran asegurados a la estructura mediante abrazaderas metálicas de 2

pulgadas, permitiendo una correcta sujeción y facilitando su desmontaje en caso de mantenimiento. En los extremos de cada tubo se emplearon uniones de PVC de 2 pulgadas y reducciones de 2 pulgadas a 1/2 pulgada, las cuales permiten la conexión del sistema de recirculación de la solución nutritiva, como se muestra en la figura 8.

Figura 8

Instalación de Tubería en Soporte

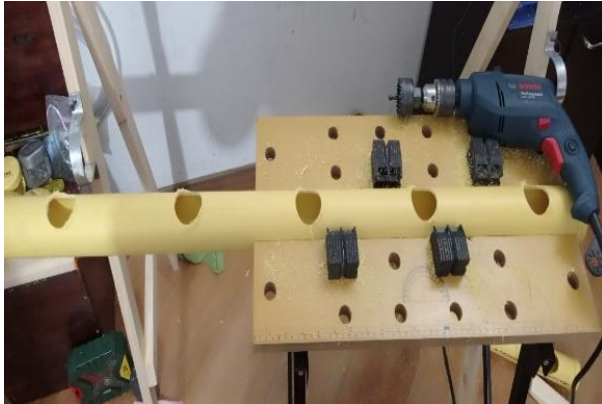


Nota. En la imagen se observa la instalación de la tubería de PVC de dos pulgadas en los listones de madera vertical.

Para realizar la apertura en donde reposarán las plántulas dentro de los tubos de PVC, se realizan los huecos por medio de una sierra copa de 44 mm y un taladro percutor, entre orificio y orificio se deja una distancia de 20 cms, posteriormente se lijan los bordes con una lija #400 para eliminar rebabas o desperdicio y mejorar el acabado.

Figura 9

Apertura de Huecos con Sierra Copa y Taladro



Nota. En la imagen se muestra los elementos usados en la apertura de los orificios para las plantas.

Figura 10

Lijado de Orificio con Lija #400



Nota. En la imagen se observa la necesidad de realizar el lijado de la tubería de PVC para retirar la rebaba del material.

Instalación de Tubería con Orificios y Sujeción a Soporte

Nota. En la figura se observa los listones de madera pino, con la apertura de los orificios en la tubería de PVC y a su vez la fijación con abrazaderas metálicas.

El sistema hidráulico se complementa con tubería de PVC de 1/2 pulgada, codos en PVC y uniones macho y hembra de conexión lisa, lo que posibilita la conducción eficiente del agua desde el depósito hacia los canales de cultivo y su posterior retorno.

Asimismo, se usa manguera transparente con un espesor de 11mm y diámetro interno de 8 mm, empleada para visualizar el flujo de la solución nutritiva, y manguera de jardín de 1/2 pulgada, conectada mediante adaptadores o acoples de media pulgada, que facilitan la distribución del agua entre los diferentes niveles del sistema. Para asegurar las conexiones hidráulicas se utilizaron abrazaderas metálicas de 1/2 pulgada, evitando fugas y garantizando la presión adecuada del flujo.

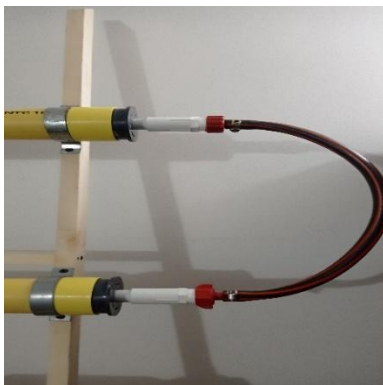
Componentes de PVC



Nota. En la figura se observa el proceso de pegado buje de 2" a 1/2", tubo PVC 1/2", unión hembra 1/2" y racor de 1/2" a 3/4".

Figura 13

Unión de PVC y Manguera de 1/2"



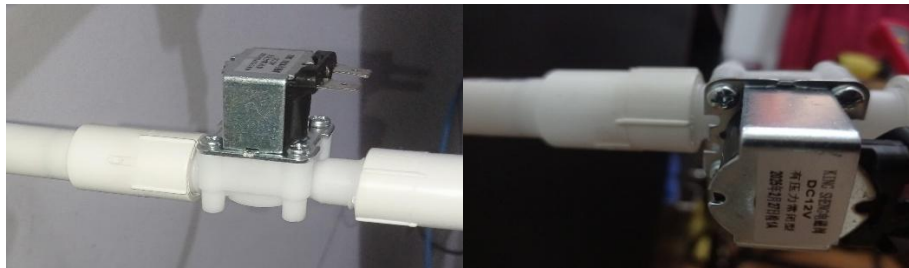
Nota. En la figura se muestra el resultado de la unión acople de 3/4" a manguera de jardín de 1/2", para recircular la solución nutritiva.

En conjunto, el montaje estructural y el sistema de conducción de la solución nutritiva 45 es funcional, modular y adaptable, que permite la recirculación del agua y los nutrientes, optimizando el uso de los recursos hídricos. Esta configuración resulta adecuada para la implementación de un sistema hidropónico vertical automatizado, ya que facilita la integración de sensores, actuadores y elementos electrónicos, contribuyendo al desarrollo eficiente del cultivo.

Suministro de agua y recirculación de la misma

Figura 14

Electroválvula de 12 VDC



Nota. en la figura se observa la electroválvula de 12 VDC, instalada en la parte final del recorrido de la solución nutritiva, la cual funciona por gravedad.

El sistema de suministro y recirculación de agua del cultivo hidropónico vertical automatizado fue diseñado para garantizar una distribución eficiente de la solución nutritiva, así como para prevenir desbordamientos y pérdidas de agua durante su operación. El sistema dispone de un tanque de almacenamiento con capacidad de 15 litros, el cual abastece la solución nutritiva requerida por los cinco tubos de cultivo, cada uno con un consumo aproximado de 2,3 litros, alcanzando un volumen total cercano a 11,5 litros. A este valor se suma aproximadamente 1 litro adicional correspondiente al volumen contenido en las mangueras, conexiones y líneas de retorno,

lo que permite un funcionamiento estable dentro de la capacidad del tanque, por lo cual se⁴⁶ seleccionó un tanque de 15 litros.

Figura 15

Contenedor - Salida e Ingreso de Nutrientes



Nota. En la figura se observa el contenedor de 15 litros para el almacenamiento y recirculación de la solución nutritiva.

Figura 16

Retorno de Agua al Accionarse Electroválvula



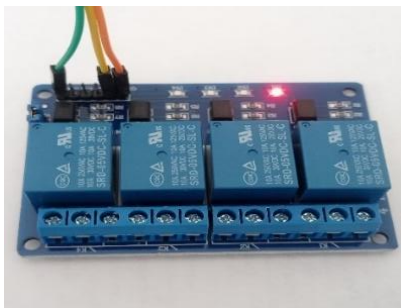
Nota. En la figura se muestra el final de la tubería de PVC, la cual retorna al contenedor de almacenamiento de la solución nutritiva.

La recirculación de la solución nutritiva se realiza mediante una bomba de agua sumergible de 12 VDC, con un caudal de 240 L/h y conexiones de 8 mm de diámetro en la entrada y salida, elevándolo 1,40 mts de altura. Esta bomba impulsa el agua desde el tanque

hacia la parte superior del sistema, desde donde la solución se distribuye por gravedad a través ⁴⁷ de los tubos de cultivo, permitiendo el contacto directo con las raíces de las plantas y favoreciendo la absorción de nutrientes. Posteriormente, el agua retorna nuevamente al tanque, completando el ciclo de recirculación y reduciendo el consumo hídrico del sistema.

Figura 17

Rele Octoacoplado 4 Canales de 5VDC



Nota. En la figura se observa un rele octoacoplado de 4 canales a 5VDC, el cual es usado para manejar los actuadores como son la bomba de agua sumergible y la valvula solenoide NC.

Figura 18

Bomba Sumergible



Nota. En la imagen se enseña la bomba de agua sumergible usada dentro del contenedor para la recirculación de la solución nutritiva, la cual tiene como características, que maneja un voltaje de 12 VDC y 240 litros por hora, a máximo 1.50 metros de altura.

Manguera Transparente en Soporte

Nota. En la figura se observa cómo se sujetó la manguera transparente de diámetro interno 8mm a una altura de 1.40 metros desde el fondo del contenedor de solución nutritiva al tubo de 2” más elevado del sistema.

Adicionalmente, el sistema incorpora dos sensores de nivel tipo flotador, cuya función es garantizar un control seguro del volumen de agua y evitar el rebose del sistema. El primer flotador se encuentra ubicado en el tubo de cultivo más alto, mientras que el segundo está instalado en el tubo de cultivo más bajo. Ambos sensores trabajan de manera conjunta para monitorear el nivel de la solución nutritiva durante la operación del sistema. Cuando alguno de los flotadores detecta un nivel de agua superior al establecido, se envía una señal al sistema de control para apagar automáticamente la bomba, evitando así el desbordamiento del agua y posibles daños a la estructura o a los componentes electrónicos.

Flotador y Regleta de Conexión

Nota. En la figura se observa el sensor de nivel vertical (flotador), el cual se implementó para evitar reboses de líquido.

Figura 21*Sensores de Nivel Vertical*

Nota. En la figura se muestra cómo se instalaron los dos sensores de nivel vertical (flotadores) en tubos de PVC #1 y #5 del sistema hidropónico.

Este mecanismo de seguridad permite mantener niveles óptimos de agua dentro del sistema hidropónico, mejora la confiabilidad del proceso de recirculación y facilita la operación continua del cultivo en entornos interiores. En consecuencia, la integración de los flotadores de nivel contribuye significativamente a la eficiencia, seguridad y sostenibilidad del sistema

hidropónico vertical automatizado, alineándose con los objetivos del proyecto de optimizar el uso de los recursos hídricos y promover prácticas agrícolas sostenibles en espacios urbanos. 50

Figura 22

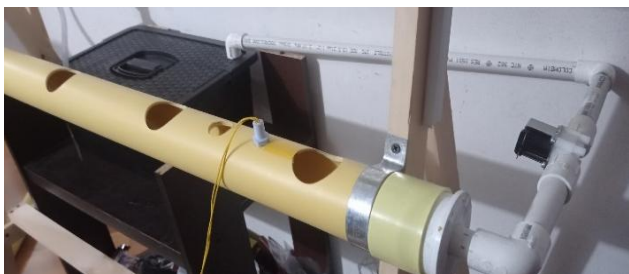
Vista Lateral Flotador



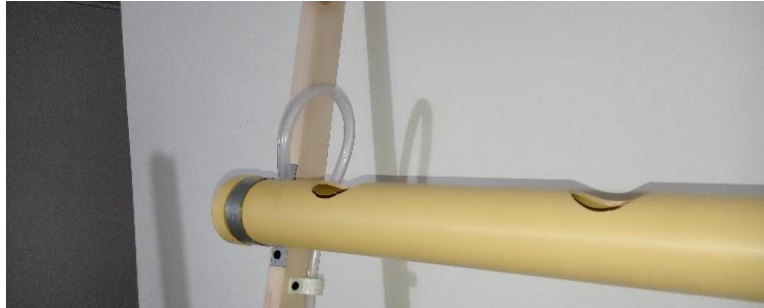
Nota. En la figura se observa la vista lateral de uno de los dos flotadores instalados en el sistema.

Figura 23

Tubería Final Para el Retorno de la Solución Nutritiva



Nota. En la figura se muestra el último tubo de PVC de 2", que conduce a una reducción de PVC de ½", llegando finalmente al contenedor de la solución nutritiva.

Manguera Transparente

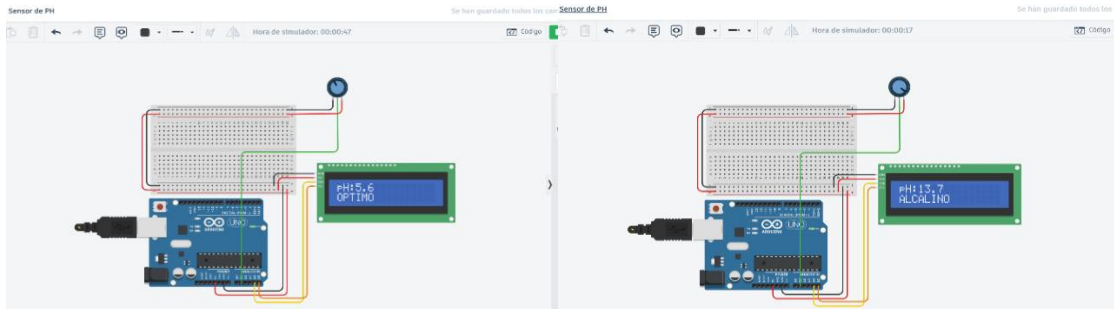
Nota. En la figura se observa la parte superior de la manguera que suministra la solución nutritiva hasta la parte más elevada del sistema.

Fase 3: Simulaciones en Tinkercad*Simulación Sensor de pH*

El pH es uno de los parámetros más críticos en los sistemas hidropónicos, ya que controla la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Valores de pH fuera del rango adecuado pueden generar deficiencias nutricionales, aun cuando la solución contenga los nutrientes necesarios.

El sensor de pH fue simulado mediante un potenciómetro, representando una señal analógica que varía entre 0 y 1023, la cual fue escalada a un rango real de pH entre 0 y 14. Para el cultivo de lechuga, se consideró como rango óptimo un pH entre 5.5 y 6.5 (Mundo Hidroponía, 2025), el cual fue visualizado en la pantalla LCD junto con un mensaje de estado.

Simulación de Sensor de pH



Nota. En la imagen se observa los parametros que arroja la simulación del sensor de pH con los elementos requeridos en tinkercad.

Código:

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
// LCD I2C dirección Tinkercad
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x20, 16, 2);
```

```
const int sensorPH = A1;
```

```
void setup() {
```

```
  lcd.init();
```

```
  lcd.backlight();
```

```
lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("Sensor de pH");

delay(2000);

lcd.clear();

}

void loop() {

  int adcPH = analogRead(sensorPH);

  // Escalamiento ADC (0–1023) a pH (0–14)

  float pH = (adcPH * 14.0) / 1023.0;

  lcd.setCursor(0, 0);

  lcd.print("pH:");

  lcd.print(pH, 1); // 1 decimal

  lcd.print(" ");

  lcd.setCursor(0, 1);

  // Evaluación para hidroponia

  if (pH >= 5.5 && pH <= 6.5) {

    lcd.print("OPTIMO ");

  }

}
```

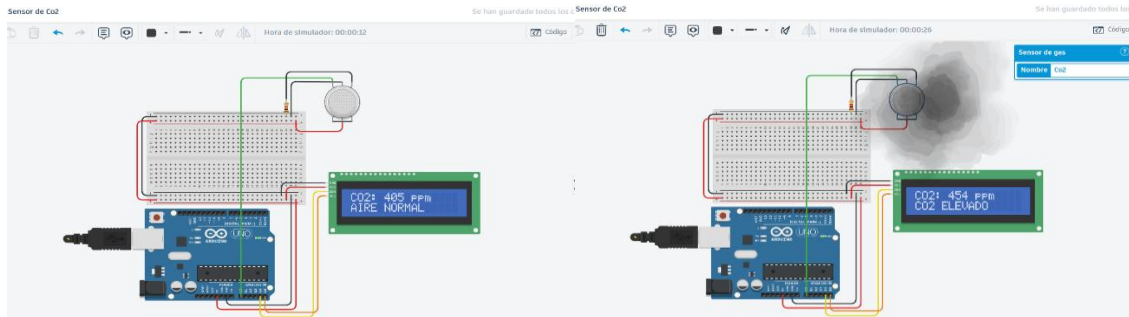
```
else if (pH < 5.5) {  
    lcd.print("ACIDO    ");  
}  
else {  
    lcd.print("ALCALINO  ");  
}  
  
delay(500);  
}
```

Simulación sensor de calidad del aire

La concentración de CO₂ en el ambiente, influye directamente en el proceso de fotosíntesis. En ambientes interiores, una ventilación deficiente puede provocar acumulación de CO₂, afectando el desarrollo del cultivo y la salud de las personas.

Para esta simulación, se utilizó el sensor de gas genérico de Tinkercad, el cual entrega una señal analógica proporcional a la concentración simulada. Dicha señal fue escalada para representar valores aproximados entre 400 ppm (aire limpio, valor típico en Bogotá) y 800 ppm (nivel elevado) (USDA, 2025). Los valores obtenidos fueron mostrados en la pantalla LCD, permitiendo clasificar el aire como normal, elevado o peligroso.

Simulación de Sensor Calidad del Aire



Nota. En la imagen se observa los parametros de medición de calidad del aire en la simulación un rango como normal y otro elevado en tinkercad.

Código:

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x20, 16, 2);
```

```
const int sensorGas = A0;
```

```
void setup() {
```

```
  lcd.init();
```

```
  lcd.backlight();
```

```
  lcd.setCursor(0, 0);
```

```
lcd.print("Sensor CO2");

delay(2000);

lcd.clear();

}

void loop() {

  int lecturaGas = analogRead(sensorGas);

  // Escalamiento: 0-1023 → 380-800 ppm
  int co2ppm = map(lecturaGas, 0, 1023, 370, 800);

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("CO2:");

  lcd.setCursor(5, 0);
  lcd.print(co2ppm);
  lcd.print(" ppm ");

  lcd.setCursor(0, 1);

  if (co2ppm < 450) {
    lcd.print("AIRE NORMAL ");
  }
}
```

```
else if (co2ppm < 600) {  
    lcd.print("CO2 ELEVADO ");  
}  
else if (co2ppm < 700) {  
    lcd.print("ALERTA CO2 ");  
}  
else {  
    lcd.print("PELIGRO CO2 ");  
}  
  
delay(500);  
}
```

Con base en la referencia internacional AQI, se modifica el código para que se visualice bueno, moderado, pobre, poco saludable o peligroso (Iboca, 2026).

Código

```
int mq135 = A0;  
int valor;  
int R0 = 400; // Valor de referencia en aire limpio  
int aqi; // AQI cualitativo estimado  
  
void setup() {  
    Serial.begin(9600);  
}
```

```
void loop() {  
  
  valor = analogRead(mq135);  
  
  // Conversión cualitativa de señal MQ-135 a AQI estimado  
  
  if (valor <= R0 * 1.2) {  
  
    aqi = 50;  
  
    Serial.println("AQI: 0–50 | Estado: BUENO");  
  
  }  
  
  else if (valor <= R0 * 1.5) {  
  
    aqi = 100;  
  
    Serial.println("AQI: 51–100 | Estado: MODERADO");  
  
  }  
  
  else if (valor <= R0 * 1.8) {  
  
    aqi = 150;  
  
    Serial.println("AQI: 101–150 | Estado: POBRE ");  
  
  }  
  
  else if (valor <= R0 * 2.2) {  
  
    aqi = 200;  
  
    Serial.println("AQI: 151–200 | Estado: POCO SALUDABLE ");  
  
  }  
  
  else if (valor <= R0 * 2.8) {  
  
    aqi = 300;
```

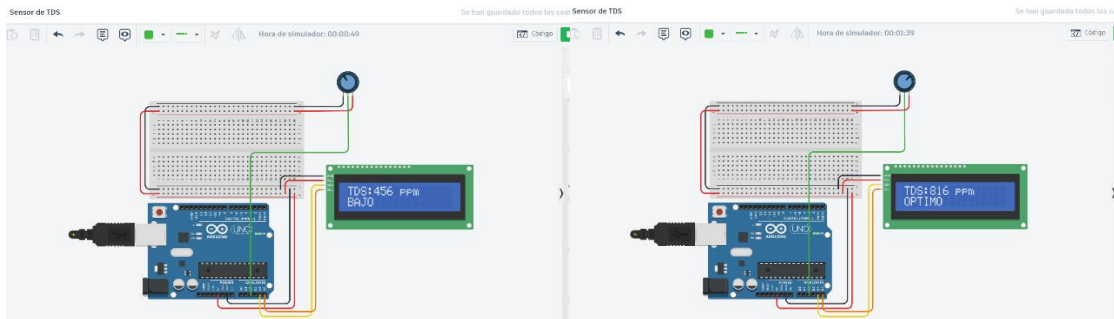
```
Serial.println("AQI: 201–300 | Estado: SEVERO");  
  
}  
  
else {  
  
  aqi = 301;  
  
  Serial.println("AQI: >301 | Estado: PELIGROSO");  
  
}  
  
  
Serial.print("Lectura MQ-135: ");  
  
Serial.println(valor);  
  
Serial.println("-----");  
  
  
delay(2000);  
  
}
```

Simulación Sensor de TDS

El sensor TDS permite conocer la concentración de sales disueltas en la solución nutritiva, lo cual es fundamental para garantizar un aporte adecuado de nutrientes en sistemas hidropónicos. Un valor excesivo de TDS puede generar estrés osmótico, mientras que valores bajos provocan deficiencias nutricionales.

Dado que Tinkercad no dispone de un sensor TDS real, este fue simulado mediante un potenciómetro, escalando la señal analógica a un rango de 0 a 1200 ppm. Para el cultivo de lechuga se estableció un rango óptimo entre 700 y 1150 ppm (Growace, 2026), permitiendo evaluar si la solución nutritiva se encuentra en condiciones adecuadas.

Simulación de Sensor TDS



Nota. En la figura se muestra la simulación del sensor de solidos disueltos totales (TDS), con un rango de bajo y de óptimo que se visualiza en la pantalla LCD, teniendo en cuenta la variación de 700 a 1150 ppm.

Código

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x20, 16, 2);
```

```
const int sensorTDS = A2;
```

```
void setup() {
```

```
  lcd.init();
```

```
  lcd.backlight();
```

```
lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("Sensor TDS");

delay(2000);

lcd.clear();

}

void loop() {

  int adcTDS = analogRead(sensorTDS);

  // Escalamiento ADC → TDS (ppm)

  int tds = map(adcTDS, 0, 1023, 0, 1200);

  lcd.setCursor(0, 0);

  lcd.print("TDS:");

  lcd.print(tds);

  lcd.print(" ppm ");

  lcd.setCursor(0, 1);

  // Evaluación hidroponica

  if (tds < 300) {

    lcd.print("MUY BAJO ");

  }

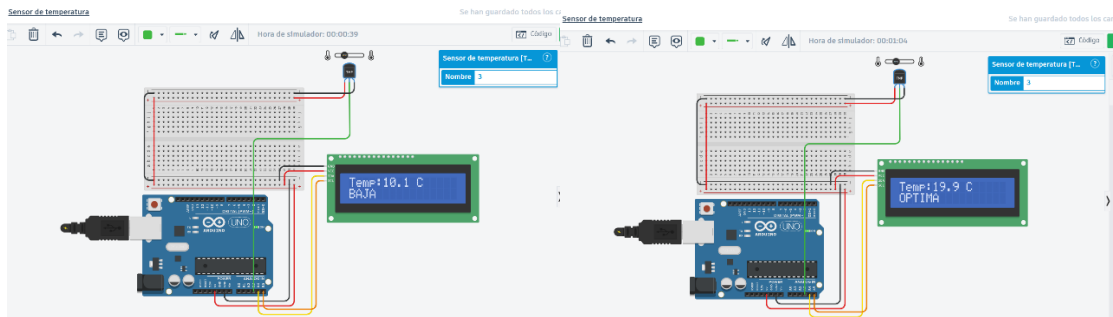
}
```

```
else if (tds < 700) {  
    lcd.print("BAJO    ");  
}  
else if (tds <= 1150) {  
    lcd.print("OPTIMO  ");  
}  
else {  
    lcd.print("ALTO    ");  
}  
  
delay(500);  
}
```

Simulación Sensor de Temperatura

La temperatura ambiente es un factor determinante en el crecimiento de la lechuga, especialmente en sistemas hidropónicos instalados en el interior de una vivienda. Temperaturas fuera del rango óptimo pueden generar estrés térmico y afectar la calidad del cultivo.

En el sistema se implementó el sensor TMP36, el cual fue simulado en Tinkercad y conectado al Arduino mediante una entrada analógica. La señal de salida del sensor fue convertida a grados Celsius mediante una ecuación lineal. Para el cultivo de lechuga se definió como rango óptimo una temperatura entre 18 °C y 24 °C (P'unguari Juárez, 2025), mostrando su estado directamente en la pantalla LCD.

Simulación de Sensor de Temperatura

Nota. En la imagen se observa la simulación del sensor de temperatura, el cual indica en la pantalla LCD, conforme a lo programado que se estima como un rango óptimo los 19.9°C.

Código:

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x20, 16, 2);
```

```
const int sensorTemp = A3;
```

```
void setup() {
```

```
  lcd.init();
```

```
  lcd.backlight();
```

```
  lcd.setCursor(0, 0);
```

```
lcd.print("Temp Ambiente");  
  
delay(2000);  
  
lcd.clear();  
  
}  
  
void loop() {  
  
    int adcTemp = analogRead(sensorTemp);  
  
    // Conversion ADC a voltaje  
  
    float voltaje = adcTemp * (5.0 / 1023.0);  
  
    // Conversion a grados Celsius  
  
    float temperatura = (voltaje - 0.5) * 100.0;  
  
    lcd.setCursor(0, 0);  
  
    lcd.print("Temp:");  
  
    lcd.print(temperatura, 1);  
  
    lcd.print(" C ");  
  
    lcd.setCursor(0, 1);  
  
    // Evaluación para lechuga  
  
    if (temperatura >= 18 && temperatura <= 24) {
```

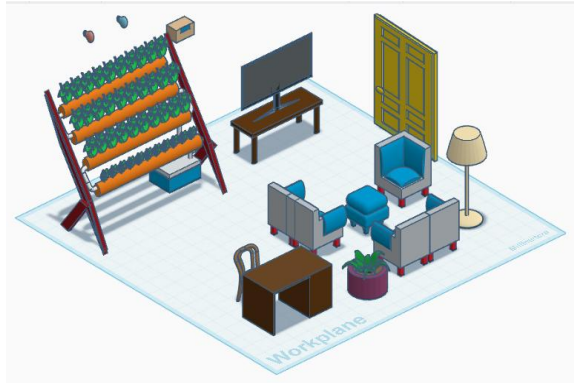
```
    lcd.print("OPTIMA    ");  
}  
else if (temperatura < 18) {  
    lcd.print("BAJA    ");  
}  
else {  
    lcd.print("ALTA    ");  
}  
  
delay(500);  
}
```

Simulación - Diseño Físico del Cultivo Hidropónico en Interiores

Se desarrolló una simulación del sistema del cultivo hidropónico automatizado mediante el uso del software Tinkercad, el cual permite representar de manera virtual la distribución del espacio dentro de una unidad habitacional (apartamento). Esta simulación facilita una visualización más precisa de la ubicación, el funcionamiento y la integración del sistema dentro del entorno doméstico, permitiendo anticipar aspectos como la viabilidad espacial, el diseño estructural y la eficiencia operativa del proyecto. De esta manera, se obtiene una aproximación realista al montaje físico, como se ilustra a continuación. Link:

<https://www.tinkercad.com/things/aAaPJLiJrIC-proyecto-aplicado>

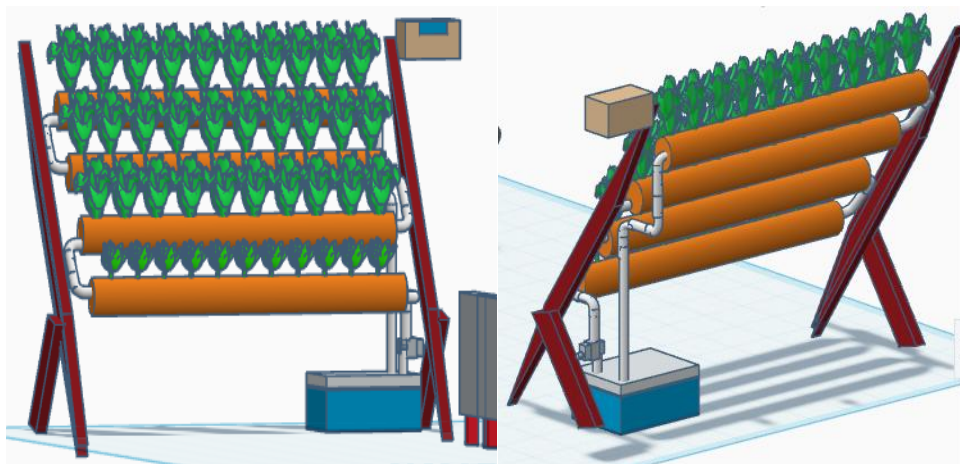
Simulación del Entorno en Tinkercad



Nota. En la imagen se observa la posible ubicación del cultivo hidropónico automatizado, en un apartamento, más exactamente a un costado de la sala.

Figura 30

Distribución de Elementos y Componentes para Montaje

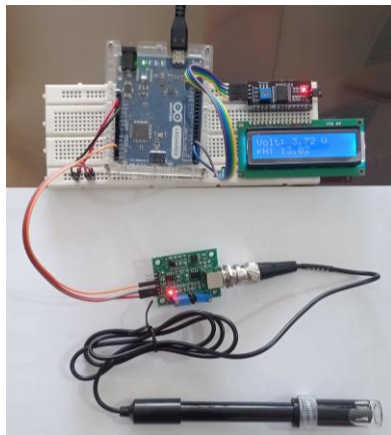


Nota. En la figura se observa la vista de frente y posterior del cultivo hidropónico automatizado.

Sensor de pH de 0-14

Figura 31

Calibración Sensor de pH



Nota. En la figura se muestra la conexión física del sensor de Ph a la placa de Arduino Leonardo, para ser visualizados sus valores a través de la pantalla LCD.

Figura 32

Buffer o Solución de 4ph y 7ph

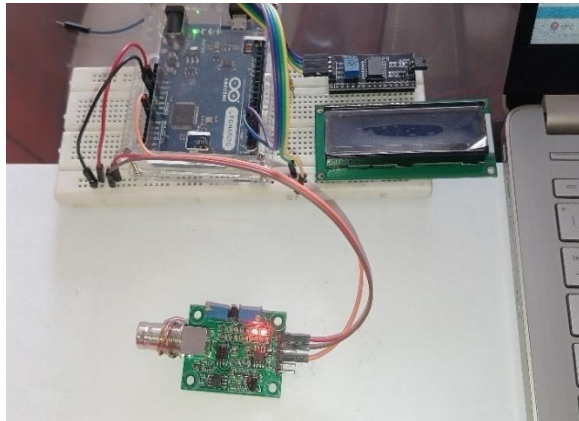


Nota. En la figura se observa los dos buffer o soluciones usados para calibrar el sensor de pH, permitiendo mostrar unas lecturas acertadas.

En la figura 30, se observa el montaje empleado para la medición y calibración del pH 68 para el sistema de cultivo hidropónico automatizado. El sistema está conformado por una placa Arduino (Leonardo), una protoboard utilizada para la distribución de energía y señales, un sensor de pH con rango de medición de 0 a 14, una pantalla LCD 16×2 con módulo I2C para la visualización de datos y cables tipo jumper, que permiten la correcta interconexión entre los distintos componentes electrónicos. Así mismo, se observa el electrodo del sensor de pH conectado mediante un conector BNC, el cual se introduce directamente en las soluciones a medir.

Figura 33

Cortocircuitar el Módulo del Sensor pH



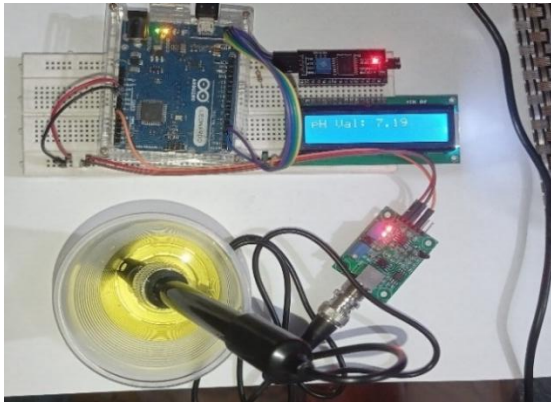
Nota. En la figura se muestra como con un cable se cortocircuita el módulo del sensor para iniciar calibración del sensor

La pantalla LCD muestra en tiempo real tanto el voltaje de salida del sensor como el valor de pH calculado, lo que permite verificar de manera inmediata el comportamiento del sensor durante el proceso de calibración. Este tipo de visualización resulta fundamental para el

monitoreo continuo del cultivo hidropónico, ya que facilita la identificación de variaciones en ⁶⁹ la calidad de la solución nutritiva.

Figura 34

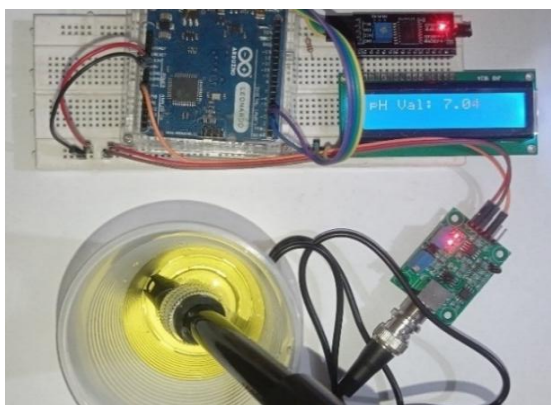
Calibración del Sensor de pH con Buffer de ph 7,0



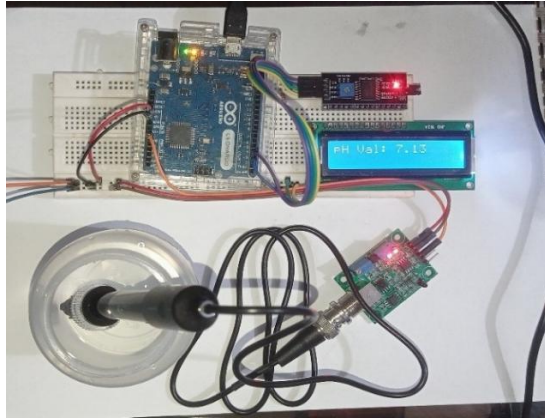
Nota. En la figura se muestra el proceso de calibración del sensor por medio de una solución buffer de pH 7,0, por medio del código de lectura y visualización en una pantalla lcd.

Figura 35

Resultado Después de la Calibración I



Nota. En la imagen se observa el resultado de la calibración con el buffer pH 7,0 mostrando este valor en la pantalla lcd.

Verificación Agua de Grifo

Nota. En la figura se muestra la validación de la lectura con agua del grifo dando un valor de pH 7,13.

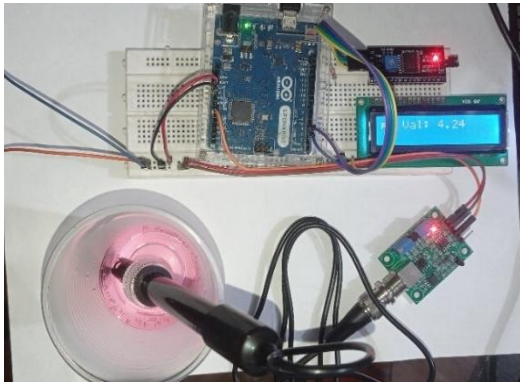
Para garantizar lecturas confiables, se llevó a cabo el proceso de calibración del sensor de pH empleando soluciones buffer estándar de pH 4 y pH 7, las cuales son comúnmente utilizadas en sistemas de medición electroquímica. Inicialmente, el electrodo fue enjuagado con agua destilada y secado suavemente, con el fin de eliminar residuos que pudieran alterar las mediciones. Posteriormente, el sensor fue sumergido en la solución buffer de pH 7, permitiendo que la lectura se estabilizara durante algunos minutos. Una vez alcanzada la estabilidad, se ajustaron los parámetros del programa en el Arduino hasta que el valor mostrado en la pantalla coincidiera con el valor real de la solución.

Seguidamente, el electrodo fue nuevamente limpiado y sumergido en la solución buffer de pH 4, repitiendo el procedimiento de estabilización y ajuste. Este proceso permitió establecer una relación más precisa entre el voltaje entregado por el sensor y el valor real de pH, mejorando

así la exactitud del sistema en un rango ácido-neutro, el cual es especialmente relevante para 71 cultivos hidropónicos.

Figura 37

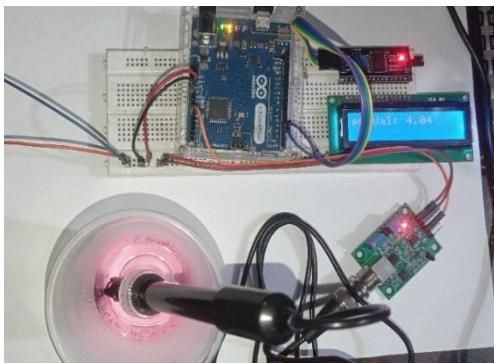
Calibración del Sensor de pH con Buffer de ph 4,0



Nota. En la figura se muestra el proceso de calibración del sensor por medio de una solución buffer de pH 7,0, por medio del código de lectura y visualización en una pantalla lcd.

Figura 38

Resultado Después de la Calibración II



Nota. En la imagen se observa el resultado de la calibración con el buffer pH 4,0 mostrando este valor en la pantalla lcd.

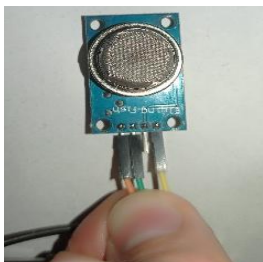
Una vez finalizada la calibración con ambos buffers, se realizaron pruebas adicionales ⁷² para verificar la repetibilidad y estabilidad de las lecturas, observando que los valores mostrados en la pantalla LCD se mantenían coherentes y constantes. Este procedimiento valida el correcto funcionamiento del sistema de medición y su idoneidad para ser integrado de forma permanente al prototipo de cultivo hidropónico automatizado.

En consecuencia, el montaje y la calibración descritos permiten asegurar un monitoreo preciso del pH de la solución nutritiva, variable clave para el crecimiento óptimo de las plantas, contribuyendo así a la eficiencia del sistema, al uso responsable de los recursos y al fortalecimiento de la seguridad alimentaria en entornos urbanos.

Calibración de Sensor de Aire MQ135

Figura 39

Sensor MQ135



Nota. En la figura se observa el sensor de calidad del aire MQ135

Para la medición de la calidad del aire dentro del entorno del cultivo hidropónico vertical automatizado, se implementó un sensor MQ-135, el cual permite detectar la presencia de gases contaminantes como amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), alcoholes y compuestos orgánicos volátiles, variables que pueden influir directamente en el desarrollo vegetal en espacios cerrados. El proceso de validación y calibración del sensor se llevó a cabo utilizando

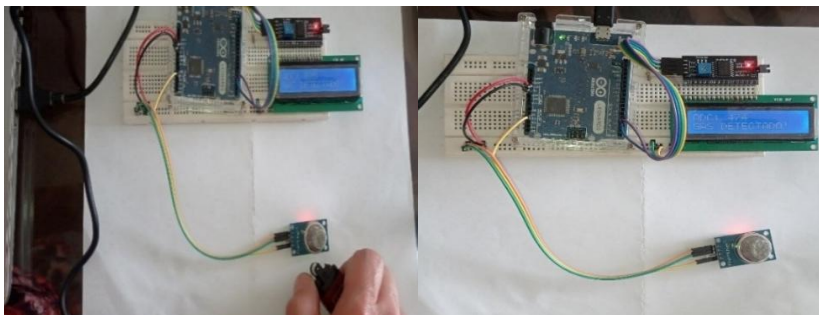
una placa Arduino Leonardo, una pantalla LCD con interfaz I2C, cables jumper para las conexiones eléctricas y un encendedor o mechera como fuente controlada de gas para las pruebas experimentales. 73

Inicialmente, se hizo el montaje del sistema electrónico, conectando el sensor MQ-135 a la placa Arduino Leonardo mediante los pines de alimentación y señal analógica, asegurando una correcta polaridad y estabilidad eléctrica. Posteriormente, la pantalla LCD I2C fue integrada al sistema para permitir la visualización en tiempo real de los valores obtenidos por el sensor, lo que facilitó el seguimiento del comportamiento del dispositivo durante las pruebas. El código de programación cargado en el Arduino se encargó de la lectura continua de la señal analógica del sensor, su conversión a valores comprensibles y la presentación de los datos en la pantalla.

Antes de iniciar la calibración, el sensor fue sometido a un tiempo de precalentamiento, recomendado por el fabricante, con el fin de estabilizar el elemento sensor y garantizar lecturas más confiables. Una vez alcanzada esta estabilización, se registraron los valores de referencia del sensor en condiciones ambientales normales, sin presencia de fuentes externas de gases, lo cual permitió establecer una línea base para el análisis posterior.

Figura 40

Calibración Sensor MQ135



Nota. En la figura se observa la validación y calibración de sensor de calidad del aire MQ135, la cual es posible visualizar en la pantalla lcd.

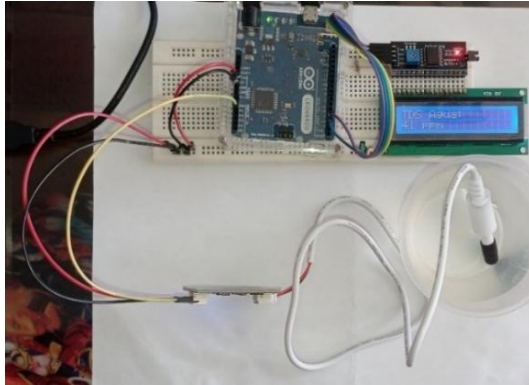
Para la validación del funcionamiento del sensor, se utilizó una mechera o encendedor, ⁷⁴ generando de manera controlada una pequeña cantidad de gas cerca del sensor. Al aproximar la fuente de gas, se observó un incremento inmediato en los valores mostrados en la pantalla LCD, lo que evidenció la sensibilidad y respuesta del sensor ante cambios en la composición del aire. Posteriormente, al retirar la fuente de gas, los valores regresaron gradualmente a los niveles de referencia, confirmando la capacidad del sensor para detectar variaciones y recuperar su estado inicial.

El proceso de calibración consistió en ajustar los parámetros del código, tales como valores de referencia y umbrales de detección, hasta obtener lecturas coherentes y estables frente a las condiciones ambientales del entorno de cultivo. Estos ajustes permitieron definir rangos adecuados para la activación de alertas o sistemas de ventilación dentro del cultivo hidropónico, contribuyendo a mantener condiciones ambientales óptimas para el crecimiento de las plantas.

Finalmente, la integración del sensor MQ-135 al sistema hidropónico automatizado permite monitorear la calidad del aire en tiempo real, lo cual resulta especialmente relevante en espacios cerrados como apartamentos.

Calibración de Sensor de TDS

Con el propósito de monitorear la concentración de sales y nutrientes disueltos en la solución nutritiva del sistema hidropónico, se implementó un sensor medidor de TDS (Sólidos Disueltos Totales), el cual permite obtener lecturas expresadas en partes por millón (PPM).

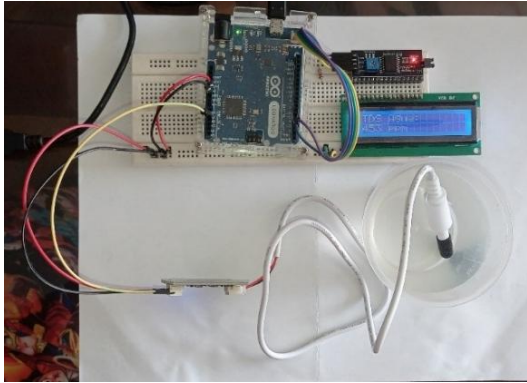
Sensor de Solidos Disueltos Totales - TDS

Nota. En la figura se observa la conexión física del sensor TDS, la placa de Arduino y la pantalla lcd.

Este parámetro resulta fundamental para garantizar una adecuada nutrición de las plantas y prevenir desequilibrios que puedan afectar su crecimiento. Para el proceso de validación y calibración del sensor se emplearon un Arduino, una protoboard, una pantalla LCD 16×2 con módulo I2C, cables jumper, un vaso con agua y sal común como material de prueba.

Inicialmente, se desarrolló el montaje del sistema electrónico sobre la protoboard, conectando el sensor TDS a la placa Arduino mediante los pines de alimentación y la entrada analógica correspondiente. La pantalla LCD con interfaz I2C fue integrada al sistema para permitir la visualización en tiempo real de los valores de TDS obtenidos. Posteriormente, se cargó en el Arduino el código de programación encargado de realizar la lectura de la señal analógica del sensor, procesarla y convertirla a valores de PPM, los cuales se muestran de forma continua en la pantalla.

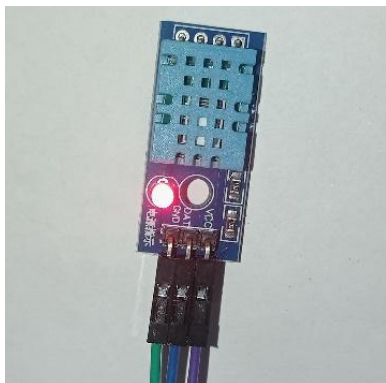
Calibración del TDS



Nota. En la figura se observa la validación y calibración del sensor con el uso de Sodio (Sal)

Calibración de Sensor de Temperatura DHT11

Sensor DHT11



Nota. En la figura se muestra el sensor de temperatura DHT11, con el cual se monitorea la temperatura ambiente del entorno del cultivo hidropónico.

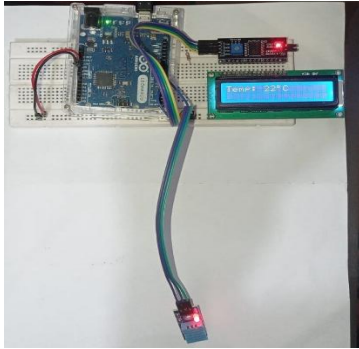
realizando una lectura inicial con agua limpia, estableciendo así un valor de referencia cercano a cero o a niveles bajos de TDS. Esta medición permitió comprobar la estabilidad del sensor y la correcta comunicación entre los componentes electrónicos. A continuación, se procedió a preparar una solución de prueba añadiendo sal común al vaso con agua, incrementando progresivamente la concentración de sólidos disueltos.

Durante este proceso, se observaron cambios graduales en los valores mostrados en la pantalla LCD, lo que evidenció la sensibilidad del sensor ante el aumento de la concentración de sales. Estos resultados permitieron validar el correcto funcionamiento del sensor TDS, ya que las lecturas aumentaron de forma proporcional a la cantidad de sal disuelta en el agua.

Posteriormente, se realizaron ajustes en los parámetros del código, tales como factores de conversión y compensación, con el fin de obtener valores más estables y coherentes con la concentración real de la solución.

Una vez finalizada la calibración, se realizaron pruebas adicionales alternando entre agua limpia y soluciones con diferentes concentraciones de sal, verificando la repetibilidad de las lecturas y la capacidad del sensor para retornar a valores bajos tras el cambio de condiciones. Este procedimiento permitió confirmar la confiabilidad del sistema de medición para su aplicación en el monitoreo continuo de la solución nutritiva del cultivo hidropónico.

En consecuencia, la validación y calibración del sensor TDS garantiza un control adecuado de la concentración de nutrientes en el sistema hidropónico automatizado, permitiendo optimizar el uso de fertilizantes, prevenir la acumulación excesiva de sales y contribuir al desarrollo saludable de las plantas; fortaleciendo así la eficiencia, sostenibilidad y viabilidad del proyecto en entornos urbanos.

Lectura Sensor DHT11

Nota. En la figura se muestra con la temperatura en interiores (Bogotá), que registra el sensor de temperatura.

En la imagen se observa un montaje experimental orientado a la calibración y verificación del sensor de temperatura DHT11, empleando una placa Arduino como unidad de adquisición y procesamiento de datos. El sensor DHT11 se encuentra conectado a la placa mediante un cableado de tres hilos (alimentación, tierra y señal digital), permitiendo la lectura directa de la temperatura ambiente en tiempo real.

La información capturada por el sensor es enviada al microcontrolador Arduino, el cual procesa los datos y los muestra de manera inmediata en una pantalla LCD de 16x2, conectada a través de un módulo I2C. Esta interfaz reduce el número de pines utilizados y facilita la comunicación entre el Arduino y la pantalla, mejorando la organización del montaje.

El presente código corresponde al desarrollo de un sistema de monitoreo y control en tiempo real aplicado a un cultivo hidropónico automatizado, implementado sobre una plataforma Arduino. El sistema integra sensores físicos para la medición de variables críticas del cultivo, tales como el pH de la solución nutritiva, la temperatura ambiente, la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) y la calidad del aire, permitiendo una supervisión continua de las condiciones del entorno.

Adicionalmente, el sistema incorpora mecanismos de control hidráulico mediante una bomba de recirculación y una válvula solenoide, cuya operación se gestiona de forma automática en función del nivel del líquido, intervalos de tiempo programados y condiciones de seguridad previamente definidas. La información del estado del sistema y de las variables medidas es presentada al usuario a través de una pantalla LCD, facilitando la visualización clara y oportuna del funcionamiento del cultivo.

Este desarrollo busca optimizar el uso de recursos hídricos y nutricionales, mejorar la estabilidad del sistema hidropónico y proporcionar una base sólida para la automatización agrícola de pequeña y mediana escala.

Funcionamiento del Sistema

El sistema opera de manera continua en tiempo real, ejecutando ciclos periódicos de lectura de sensores y control de actuadores. En condiciones normales, el sistema muestra en la pantalla LCD los valores actuales de pH, temperatura, TDS y calidad del aire, permitiendo al usuario un monitoreo constante del estado del cultivo.

La bomba de recirculación es controlada automáticamente mediante sensores de nivel (flotadores), activándose o desactivándose según la presencia o ausencia de líquido,

incorporando tiempos de espera que evitan conmutaciones bruscas y protegen los

componentes del sistema. De igual manera, la válvula solenoide se acciona de forma periódica conforme a intervalos de tiempo programados, los cuales se establecen luego de realizar diferentes pruebas, garantizando una correcta renovación o distribución de la solución nutritiva.

Cuando ocurre un evento relevante, como el encendido o apagado de la bomba, la apertura o cierre de la válvula, o la finalización del ciclo de operación del sistema, la pantalla LCD cambia temporalmente para mostrar el estado del actuador correspondiente. Transcurrido el tiempo establecido, el sistema retorna automáticamente a la visualización de las variables de sensores, manteniendo un equilibrio entre información operativa y monitoreo continuo.

Este enfoque permite un control eficiente, seguro y confiable del cultivo hidropónico, dejando el sistema preparado para ampliaciones futuras, como control automático por rangos de pH, TDS o integración con sistemas de monitoreo remoto.

Código:

```
#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include <EEPROM.h>

#include "GravityTDS.h"

#include <DHT.h>

// =====

// Lcd

// =====

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
```

```
// =====  
  
// Pines sensores  
  
// =====  
  
#define PIN_PH    A0  
  
#define PIN_TDS   A1  
  
#define PIN_AIRE  A2  
  
#define DHTPIN    7  
  
#define DHTTYPE   DHT11  
  
  
// =====  
  
// Pines control hidráulico  
  
// =====  
  
#define PIN_FLOTADOR_1 2  
  
#define PIN_FLOTADOR_2 3  
  
#define PIN_RELE_BOMBA 8  
  
#define PIN_VALVULA    9  
  
  
// =====  
  
// Objetos  
  
// =====  
  
GravityTDS gravityTds;  
  
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

```
// =====  
  
// Variables sensores  
  
// =====  
  
float calibration_value = 21.34;  
  
int pBuffer[10];  
  
int temp;  
  
float temperature = 20.0;  
  
float tdsValue = 0;  
  
int aireValue = 0;  
  
float pHValue = 0;  
  
  
  
  
// =====  
  
// Tiempos  
  
// =====  
  
const unsigned long TIEMPO_ESPERA      = 10000;  
  
const unsigned long TIEMPO_EJECUCION   = 80000;  
  
const unsigned long INTERVALO_VALVULA  = 7200000;  
  
// const unsigned long INTERVALO_VALVULA = 20000; // PRUEBA  
  
const unsigned long TIEMPO_VALVULA_ABIERTA = 5000;  
  
const unsigned long DURACION_EVENTO_LCD  = 10000;  
  
  
  
// =====
```

```
// Estados

// =====

bool bombaEncendida = false;

bool valvulaAbierta = false;

bool sistemaActivo = true;

// =====

// Timers

// =====

unsigned long tiempoApagado = 0;

unsigned long inicioEjecucion = 0;

unsigned long ultimoCicloValv = 0;

unsigned long inicioValvula = 0;

unsigned long tiempoEventoLCD = 0;

// =====

// Modos de pantalla

// =====

enum ModoPantalla {

    PANTALLA_SENSORES,

    PANTALLA_EVENTO

};
```

ModoPantalla pantallaActual = PANTALLA_SENSORES;

84

// =====

// Setup

// =====

void setup() {

 Serial.begin(9600);

 pinMode(PIN_FLOTADOR_1, INPUT_PULLUP);

 pinMode(PIN_FLOTADOR_2, INPUT_PULLUP);

 pinMode(PIN_RELE_BOMBA, OUTPUT);

 pinMode(PIN_VALVULA, OUTPUT);

 digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA, HIGH);

 digitalWrite(PIN_VALVULA, LOW);

 Wire.begin();

 lcd.init();

 lcd.backlight();

 dht.begin();

 gravityTds.setPin(PIN_TDS);

```
gravityTds.setAref(4.9);
```

```
gravityTds.setAdcRange(1024);
```

```
gravityTds.begin();
```

```
lcd.setCursor(0, 0);
```

```
lcd.print("Cult.Hidroponico");
```

```
lcd.setCursor(0, 1);
```

```
lcd.print(" Automatizado ");
```

```
delay(2000);
```

```
lcd.clear();
```

```
inicioEjecucion = millis();
```

```
ultimoCicloValv = millis();
```

```
}
```

```
// =====
```

```
// Loop principal
```

```
// =====
```

```
void loop() {
```

```
    unsigned long ahora = millis();
```

```
    // ===== FIN DEL SISTEMA =====
```

```
    if (sistemaActivo && (ahora - inicioEjecucion >= TIEMPO_EJECUCION)) {
```

```
digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA, HIGH);

digitalWrite(PIN_VALVULA, LOW);

bombaEncendida = false;

valvulaAbierta = false;

sistemaActivo = false;

activarPantallaEvento();

}

if (!sistemaActivo) {

    gestionarPantalla();

    return;

}

// ===== Lectura sensores =====

leerSensores();

// ===== Control bomba =====

int estado1 = digitalRead(PIN_FLOTADOR_1);

int estado2 = digitalRead(PIN_FLOTADOR_2);

bool nivelBajoAmbos = (estado1 == LOW && estado2 == LOW);

if (!nivelBajoAmbos && bombaEncendida) {

    digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA, HIGH);
```

```
bombaEncendida = false;

tiempoApagado = ahora;

activarPantallaEvento();

}

if (nivelBajoAmbos && !bombaEncendida) {

    if (ahora - tiempoApagado >= TIEMPO_ESPERA) {

        digitalWrite(PIN_RELE_BOMBA, LOW);

        bombaEncendida = true;

        activarPantallaEvento();

    }

}

// ===== Control válvula =====

if (!valvulaAbierta && (ahora - ultimoCicloValv >= INTERVALO_VALVULA)) {

    digitalWrite(PIN_VALVULA, HIGH);

    valvulaAbierta = true;

    inicioValvula = ahora;

    activarPantallaEvento();

}

if (valvulaAbierta && (ahora - inicioValvula >= TIEMPO_VALVULA_ABIERTA)) {

    digitalWrite(PIN_VALVULA, LOW);
```

```
    valvulaAbierta = false;

    ultimoCicloValv = ahora;

    activarPantallaEvento();

}

gestionarPantalla();

}

// =====

// Funciones

// =====

void activarPantallaEvento() {

    pantallaActual = PANTALLA_EVENTO;

    tiempoEventoLCD = millis();

}

void gestionarPantalla() {

    if (pantallaActual == PANTALLA_EVENTO) {

        mostrarPantallaEvento();

        if (millis() - tiempoEventoLCD >= DURACION_EVENTO_LCD) {

            pantallaActual = PANTALLA_SENSORES;

        }

    } else {
```

```
    mostrarPantallaSensores();  
  
}  
  
}  
  
void leerSensores() {  
  
    for (int i = 0; i < 10; i++) {  
  
        phBuffer[i] = analogRead(PIN_PH);  
  
        delay(20);  
  
    }  
  
    for (int i = 0; i < 9; i++) {  
  
        for (int j = i + 1; j < 10; j++) {  
  
            if (phBuffer[i] > phBuffer[j]) {  
  
                temp = phBuffer[i];  
  
                phBuffer[i] = phBuffer[j];  
  
                phBuffer[j] = temp;  
  
            }  
  
        }  
  
    }  
  
    unsigned long avg = 0;  
  
    for (int i = 2; i < 8; i++) avg += phBuffer[i];
```

```
float voltage = (float)avg * 4.9 / 1024 / 6;  
pHValue = -5.70 * voltage + calibration_value;
```

```
temperature = dht.readTemperature();  
if (isnan(temperature)) temperature = 0;
```

```
gravityTds.setTemperature(temperature);  
gravityTds.update();  
tdsValue = gravityTds.getTdsValue();
```

```
int aireADC = analogRead(PIN_AIRE);  
aireValue = map(aireADC, 0, 1023, 0, 500);  
aireValue = constrain(aireValue, 0, 500);  
}
```

```
void mostrarPantallaSensores() {  
  lcd.setCursor(0, 0);  
  lcd.print("pH:");  
  lcd.print(pHValue, 1);  
  lcd.print(" Temp:");  
  lcd.print((int)temperature);  
  lcd.print((char)223);
```

```
lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("TDS:");

lcd.print((int)tdsValue);

lcd.print(" Aire:");

if (aireValue < 100) lcd.print("0");

if (aireValue < 10) lcd.print("0");

lcd.print(aireValue);

}

void mostrarPantallaEvento() {

lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print(bombaEncendida ? "Bomba: ON " : "Bomba: OFF ");

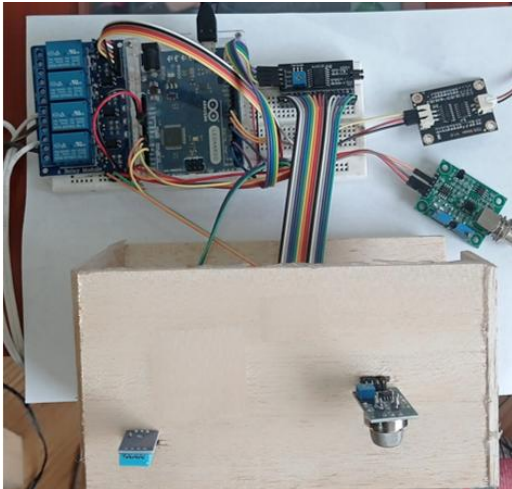
lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print(valvulaAbierta ? "Valvula: Abierta " : "Valvula: Cerrada ");

}
```

Figura 45

Hardware del Proyecto



Nota. En la figura se muestra el ensamble electrónico del sistema de monitoreo para el cultivo hidropónico.

El sistema de control automatizado, se construye sobre una base de madera y se organiza de forma modular para pruebas y visualización. Se cuenta con una placa de Arduino Leonardo, que actúa como el cerebro del sistema en donde están conectados los módulos de relé, utilizados para conmutar cargas de mayor potencia, específicamente de la bomba sumergible de 12 VDC y de la válvula solenoide, permitiendo el control automático del flujo de la solución nutritiva.

Distribuidos alrededor del Arduino como se observa en la imagen se encuentran los sensores del sistema:

Un sensor de pH, encargado de medir la acidez o alcalinidad de la solución nutritiva.

Un sensor de TDS (sólidos disueltos totales), que permite estimar la concentración de nutrientes en ppm.

Un sensor de temperatura DHT11, usado para monitorear el cambio de estas condiciones.

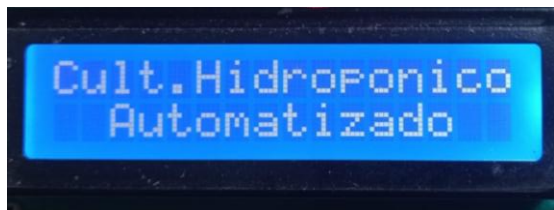
Un sensor MQ-135, destinado a la medición de la calidad del aire, útil para evaluar gases y condiciones ambientales dentro del área de cultivo.

Los sensores están interconectados mediante cables tipo jumpers, organizados para facilitar la lectura simultánea de datos. En la parte frontal inferior se aprecia un sensor de temperatura y humedad montado externamente, así como otro sensor MQ135 fijado en la madera para mediciones directas del entorno.

Finalmente, todo el sistema está pensado para que la información recopilada sea visualizada en una pantalla LCD 16×2, donde se muestran en tiempo real variables como pH, temperatura, TDS, calidad del aire y el estado de los actuadores, permitiendo al usuario supervisar fácilmente el funcionamiento del cultivo hidropónico.

Figura 46

Visualización de los Parámetros en la Pantalla LCD



Nota. En la figura se observa el mensaje informativo inicial, del sistema de monitoreo del cultivo hidropónico.

El sistema implementado integra sensores ambientales, fisicoquímicos y actuadores, controlados mediante un microcontrolador Arduino y visualizados a través de una pantalla LCD con interfaz I2C. Este sistema permite el monitoreo en tiempo real de variables fundamentales

como pH, temperatura, concentración de nutrientes (TDS) y calidad del aire, así como la supervisión del estado operativo de la bomba y la válvula solenoide. La visualización organizada de la información facilita el control del proceso, mejora la toma de decisiones y contribuye a la eficiencia y estabilidad del cultivo hidropónico.

Figura 47

Parámetros Medidos de los Sensores I



Nota. En la figura se observan inicialmente cuatro parámetros monitorizados, como son el pH, temperatura, solidos disueltos totales -TDS y calidad del aire.

Figura 48

Parámetros Medidos de los Sensores II



Nota. En la figura se muestra cuando se encuentra en funcionamiento la bomba de agua sumergible y la válvula solenoide.

Semana 1

Adaptación y establecimiento: Durante la primera semana, la lechuga se encuentra en fase de adaptación al sistema hidropónico. Las plántulas presentan hojas pequeñas, de color verde claro, y un sistema radicular incipiente. Las raíces comienzan a extenderse hacia la solución nutritiva, mostrando una coloración y aspecto sano. En esta etapa es clave mantener estabilidad en el pH, la temperatura y la oxigenación del agua para evitar estrés en la planta.

Figura 49

Plántulas de Lactuca Sativa L



Nota. En la figura se observan las plántulas lechuga que fueron adquiridas por medio de un vivero ubicado en el municipio de Cota.

En la imagen se observan plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*), en una etapa inicial de crecimiento, caracterizadas por un tamaño reducido, hojas pequeñas de color verde claro y una estructura foliar aún poco desarrollada.

Figura 50*Reguladores Para Estabilizar el pH*

Nota. En la figura se muestra pH Down y pH Up

Para la regulación del pH de la solución nutritiva entre el rango de 5.5 y 6.5 se hace uso de los productos pH Up y pH Down. Estos reguladores permiten ajustar la acidez o alcalinidad del agua según los requerimientos del cultivo, siendo el pH un parámetro crítico para la disponibilidad y absorción de nutrientes. Un control adecuado del pH contribuye al crecimiento saludable de las plantas y a la prevención de deficiencias nutricionales.

Figura 51*Componentes de la Solución Nutritiva A y B*

Nota. La figura muestra los componentes de la composición.

La composición nutricional establecida sobre la solución nutritiva A y B requerido, 97
detalla los macro y micronutrientes esenciales para el desarrollo vegetal en el cultivo de hoja.
Entre los macronutrientes se destacan el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), fundamentales
para el crecimiento foliar y radicular, así como el calcio, magnesio y azufre. Los micronutrientes,
como hierro, zinc y manganeso, cumplen funciones clave en procesos metabólicos y fisiológicos
de la planta: nitrógeno 200 ppm, fósforo: 50 ppm, potasio: 200 ppm, calcio: 150 ppm, azufre: 30
ppm, magnesio: 25ppm, hierro: 2.2ppm, zinc: 0.3 ppm, boro:0.9 ppm, manganeso: 1 ppm, cobre:
0.2 ppm, molibdeno: 0.1 ppm.

Figura 52

Preparación de la Solución Nutritiva



Nota. En la figura se muestra el resultado de la preparación de la solución nutritiva en galones nombrado como A y B.

En esta imagen se observa los dos recipientes rotulados como solución A y solución B, que contienen concentrados los nutrientes preparados por separado para evitar reacciones químicas indeseadas e igualmente estos galones se guardan en bolsas negras de basura para evitar su exposición directa al sol. Estas soluciones se mezclan posteriormente en proporciones

controladas dentro del tanque de almacenamiento, permitiendo la elaboración de una solución 98 nutritiva balanceada, adecuada para las necesidades requeridas para la lechuga.

Instrucciones para Este Caso. Disuelve la parte A en 4 litros de agua y la parte B en otros 4 litros de agua, idealmente en galones plásticos oscuros para evitar crecimiento de algas u hongos. La dosis es de 4ml/cc de A y 4ml/cc de B por litro de agua final.

Figura 53

Adaptación de las Plántulas en el Cultivo



Nota. En la figura se observa la estructura del cultivo hidropónico, el cual contiene las plántulas de lechuga, observando un desarrollo normal.

Las plántulas se encuentran en proceso de adaptación al sistema de cultivo, evidenciando un crecimiento uniforme y un estado general saludable, propio de las primeras fases del desarrollo en un cultivo hidropónico. El diseño favorece la circulación constante de la solución nutritiva y el correcto drenaje por gravedad.

Disposición del Cultivo

Nota. En la figura se observa la vista superior del cultivo y la disposición de las plántulas a través del tubo de PVC.

En esta imagen se muestra el sistema hidropónico tipo NFT con plantas de lechuga cultivadas al interior de los tubos de PVC. Las plantas presentan buen desarrollo foliar, lo que indica una adecuada absorción de nutrientes disueltos en el agua.

Semana 2

Inicio del crecimiento vegetativo: En la segunda semana se evidencia un crecimiento notable en el tamaño de las hojas, las cuales adquieren una coloración verde más intensa. El número de hojas aumenta y la planta comienza a formar una estructura más compacta. El sistema radicular se desarrolla con mayor longitud y densidad, facilitando una mejor absorción de nutrientes. No se observan signos de deficiencias nutricionales ni marchitez.

Semana 3

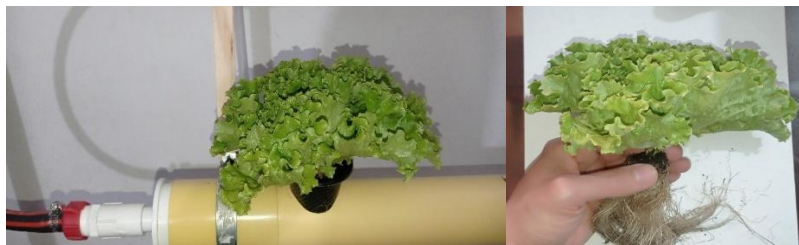
Desarrollo y expansión foliar: Durante la tercera semana, la lechuga entra en una fase de crecimiento acelerado. Las hojas se expanden significativamente, mostrando bordes más definidos y textura firme. El follaje cubre mayor área y la planta adquiere un volumen considerable. Las raíces se observan abundantes, bien oxigenadas y sin presencia de coloraciones

oscuras, lo que indica un ambiente radicular adecuado. Es necesario un monitoreo constante 100 del TDS para sostener el ritmo de crecimiento.

En esta semana, en general, la planta presenta buen estado sanitario y condiciones óptimas para continuar su crecimiento en el sistema hidropónico.

Figura 55

Crecimiento al Finalizar la Tercera Semana



Nota. En la figura se muestra el desarrollo de la lechuga al finalizar la tercera semana, en la cual se extrae de la tubería PVC para visualizarse mejor.

Semana 4

Maduración y estado óptimo de cosecha: En la cuarta semana, la lechuga alcanza un tamaño comercial. Las hojas presentan una coloración verde intensa, y buena consistencia, sin signos de amarillamiento o estrés hídrico. La planta muestra una estructura compacta y equilibrada entre follaje y raíces. En esta etapa, el cultivo se encuentra listo para cosecha, destacando un crecimiento uniforme y saludable gracias al control preciso de los parámetros requeridos del sistema hidropónico.

Crecimiento al Finalizar la Cuarta Semana

Nota. En la figura se muestra el progreso de la lechuga al finalizar la cuarta semana, y al extraerse se visualiza un buen desarrollo.

Observamos una planta de lechuga en un estado óptimo, estas características son indicativos de condiciones óptimas de nutrición, iluminación y oxigenación de las raíces, lo que demuestra el correcto funcionamiento del sistema hidropónico y el adecuado control de las variables ambientales.

Variables Analizadas

Las variables monitoreadas por el sistema incluyen el pH de la solución nutritiva, la temperatura ambiente medida en grados Celsius, la calidad del aire (AQI), los sólidos disueltos totales expresados en ppm (TDS), el nivel de agua del sistema y el uso de tablas de referencia para la medición y comparación de los valores obtenidos.

Tabla 3 Rangos de las Variables Para el Cultivo Hidropónico

Variable	Unidad	Rango óptimo
pH	–	5.5 – 6.5
Temperatura ambiente	°C	18 – 24
Calidad del aire	AQI	0 – 50
TDS	ppm	700 – 1150
Nivel de agua	Estado	Normal

Nota. En la tabla se observan los rangos establecidos con base en lo requerido sobre hidroponía en ambientes controlados para lechugas.

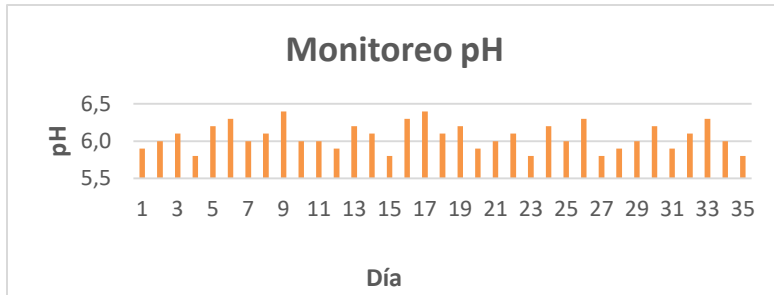
Tabla 4 Registro del Promedio de las Mediciones

Semana	pH	Temperatura (°C)	Calidad del aire	TDS (ppm)
Primera	6.0	19	Bueno	1094
Segunda	6.0	20	Bueno	1006
Tercera	6.0	20	Bueno	993
Cuarta	6.0	20	Bueno	1003

Nota: En la tabla se muestra los datos promediados a partir de la lectura de sensores analógicos instalados en el cultivo hidropónico por semana.

Figura 57

Monitoreo de pH

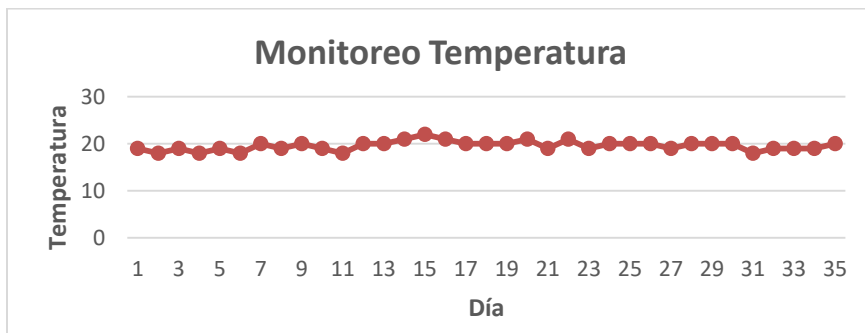


Nota. En la figura se observa la gráfica de pH versus día.

La gráfica de tendencia del pH muestra una variación controlada entre 5.8 y 6.4, manteniéndose dentro del rango óptimo establecido para el cultivo de lechugas (Ciladi, 2024). Este comportamiento evidencia la estabilidad del sistema y la correcta simulación del sensor de pH.

Figura 58

Monitoreo de Temperatura

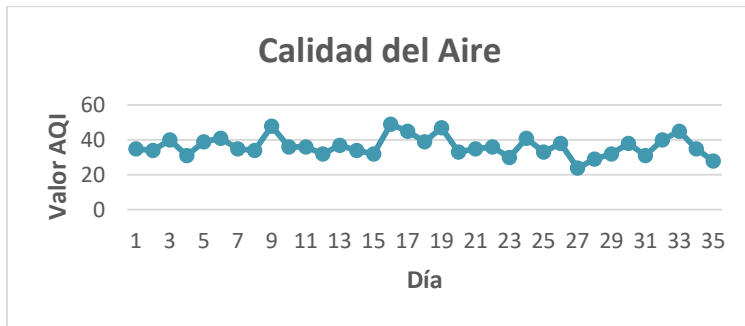


Nota. En la figura se observa la gráfica de temperatura versus día.

La temperatura ambiente presenta una tendencia estable entre 18°C y 22 °C, valores adecuados para el desarrollo del cultivo en interior de vivienda. No se observan picos críticos que puedan generar estrés térmico en las plantas.

Figura 59

Monitoreo Calidad del Aire



Nota. En la figura se observa la gráfica de índice de calidad del aire -AQI versus día

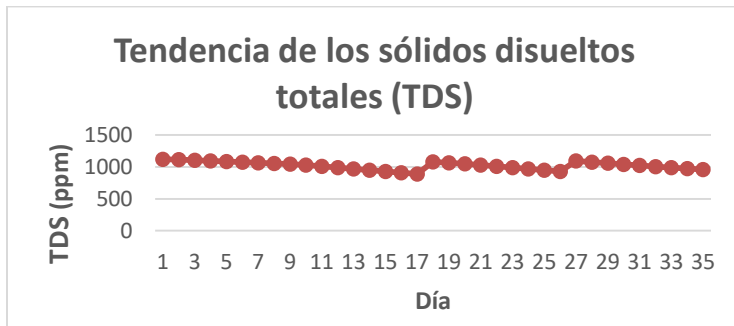
El sensor MQ-135 se empleó como un dispositivo de medición cualitativa de la calidad del aire, basado en la detección de variaciones relativas de gases contaminantes, usándose para clasificar el aire en niveles de calidad y se usa la escala de AQI (índice de calidad del aire) estadounidense que de 0 a >301 y destaca los estados de *Bueno, Moderado, Pobre, Poco saludable, Severo, Peligroso*. De lo anterior, se establece como se evidencia en la figura 48 y 49 que la calidad del aire estuvo en el rango de BUENO, es decir de 0 a 50 (Iboca, 2026).

Figura 60

Clasificación de la Calidad del Aire - AQI



Nota. En la figura se observa la clasificación de la calidad del aire tomada de AQI (s. f.) de <http://iboca.ambientebogota.gov.co/mapa/>

Monitoreo de TDS

Nota. En la figura se observa la gráfica de índice de TDS versus día

Los valores de TDS muestran un incremento gradual controlado, permaneciendo dentro del rango óptimo de 700 a 1150 ppm. Esta tendencia confirma una adecuada concentración de nutrientes en la solución hidropónica. Sobre los indicadores estadísticos utilizados, para cada variable se emplearon los siguientes indicadores estadísticos básicos:

Promedio: Representa el valor central de cada variable medida (pH, TDS, temperatura y calidad del aire). Este indicador permite comparar el comportamiento real del sistema frente a los rangos óptimos definidos en la literatura científica para el cultivo hidropónico de lechugas.

Valor mínimo y valor máximo: Permiten identificar desviaciones puntuales, picos o caídas abruptas que podrían indicar fallas en sensores, condiciones ambientales adversas o respuestas del sistema automatizado ante eventos simulados.

Frecuencia de medición: Se establecieron lecturas periódicas a intervalos constantes (diarias en la semana), garantizando consistencia temporal y permitiendo el análisis de tendencias a corto y mediano plazo.

En la validación del sistema hidropónico automatizado, se considera que el sistema 106 está correctamente validado cuando las variables monitoreadas se mantienen dentro de los rangos óptimos previamente definidos; además, las gráficas de tendencia evidencian estabilidad y coherencia en el comportamiento de los datos. De igual manera, las variaciones registradas deben responder adecuadamente a los cambios simulados en los sensores, demostrando la correcta interacción entre los componentes del sistema. Asimismo, la información visualizada en el LCD debe coincidir plenamente con los datos almacenados y procesados, garantizando la confiabilidad del monitoreo. En conjunto, estos aspectos permiten realizar una interpretación general de resultados objetiva, confirmando el funcionamiento adecuado y la efectividad del sistema implementado.

Por lo anterior, el sistema automatizado es funcional y confiable para el monitoreo de variables críticas en el cultivo hidropónico de lechugas. La estabilidad de los datos y su concordancia con los valores de referencia permiten concluir que el diseño propuesto cumple con los objetivos del proyecto y se ajusta a los criterios requeridos.

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del sistema hidropónico automatizado evidencian un funcionamiento estable y coherente del conjunto de hardware y software implementado. A partir de las mediciones periódicas realizadas sobre las variables críticas del cultivo (pH, sólidos disueltos totales –TDS–, temperatura ambiente y calidad del aire), se constató que el sistema respondió adecuadamente a las variaciones simuladas, manteniendo los valores dentro de los rangos óptimos establecidos para el cultivo de lechugas.

En el caso del pH de la solución nutritiva, los valores registrados se mantuvieron mayoritariamente dentro del intervalo de 5.8 a 6.4, considerado óptimo para la absorción de nutrientes en hortalizas de hoja. Las variaciones observadas fueron leves y controladas,

reflejando un comportamiento estable del sistema de monitoreo. Estos resultados son consistentes con lo reportado en estudios como los de Resh (2013) y Sonneveld y Voogt (2009), quienes destacan la importancia de mantener el pH en rangos estrechos para evitar deficiencias nutricionales y estrés fisiológico en las plantas. 107

Respecto a los sólidos disueltos totales (TDS), las mediciones se ubicaron dentro del rango de 700 a 1150 ppm, adecuado para el desarrollo vegetativo de las lechugas en sistemas hidropónicos. Las gráficas de tendencia mostraron una estabilidad aceptable, sin fluctuaciones abruptas, lo cual indica un correcto suministro de solución nutritiva. Estos resultados concuerdan con trabajos previos sobre nutrición vegetal en cultivos hidropónicos, donde se reportan rangos similares de concentración de sales para cultivos de hoja (Gómez & Martínez, 2018; López & Rodríguez, 2017).

En cuanto a la temperatura ambiente, el sistema registró valores comprendidos entre 18 °C y 22 °C, rango recomendado para el crecimiento óptimo de las especies cultivadas. La estabilidad térmica observada sugiere que el sistema de monitoreo ambiental es adecuado para detectar variaciones que podrían afectar negativamente el desarrollo del cultivo. Estudios desarrollados en entornos controlados de producción vegetal señalan que temperaturas fuera de este rango pueden provocar disminución del crecimiento y aumento del estrés fisiológico en las plantas, lo que refuerza la pertinencia de los valores obtenidos (Gómez & Martínez, 2018).

Desde el punto de vista del control hidráulico, las pruebas realizadas con bombas de agua de 12 VDC y la electroválvula normalmente cerradas (NC) demostraron un funcionamiento confiable cuando se empleó una correcta topología de conexión mediante módulos relé. Se evidenció la importancia de diferenciar entre el accionamiento de la bobina del relé y la conmutación efectiva de los contactos de potencia, identificando posibles fallas en la conexión

del módulo multicanal. Este hallazgo coincide con reportes técnicos en proyectos académicos 108 y de automatización agrícola, donde se enfatiza la necesidad de implementar medidas de protección eléctrica, como el uso de diodos de rueda libre, para garantizar la durabilidad de los actuadores (López & Rodríguez, 2017).

Al comparar los resultados obtenidos con otros trabajos relacionados con sistemas hidropónicos automatizados basados en microcontroladores, se observa una coincidencia significativa en cuanto a arquitectura, variables monitoreadas y rangos de operación. No obstante, el presente proyecto se diferencia por su enfoque integral, al combinar monitoreo ambiental, control hidráulico y visualización de datos en una sola plataforma. A diferencia de estudios que se limitan a esquemas manuales o semiautomáticos, este sistema establece una base sólida para la automatización completa del proceso de cultivo.

Asimismo, durante el periodo de evaluación del sistema, se observó un desarrollo fisiológico adecuado de la planta de lechuga, caracterizada por un crecimiento uniforme, coloración verde intensa en las hojas y ausencia de síntomas visibles de deficiencias nutricionales o estrés hídrico. En este caso, se evidenció una expansión progresiva del área foliar y una estructura compacta, indicadores de una correcta asimilación de nutrientes y condiciones ambientales favorables. Estos resultados concuerdan con lo señalado para el mantenimiento de rangos óptimos de pH, TDS y temperatura favorece el crecimiento vegetativo y la calidad del cultivo en sistemas hidropónicos, confirmando la eficacia del sistema automatizado propuesto.

En síntesis, los resultados confirman que el sistema hidropónico automatizado desarrollado es funcional, estable y técnicamente viable, permitiendo el monitoreo y control efectivo de las variables críticas del cultivo. El análisis comparativo con trabajos existentes respalda la validez del diseño propuesto y demuestra que la solución planteada se encuentra

aplicada a sistemas hidropónicos, cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos académicos y técnicos del proyecto.

El análisis de los datos obtenidos durante la implementación del sistema hidropónico automatizado para el cultivo de lechugas, se fundamenta en un enfoque de análisis descriptivo, el cual permite interpretar el comportamiento de las variables ambientales, nutricionales y demás medidas por los sensores integrados al sistema. Este tipo de análisis se considera adecuado para proyectos de carácter académico y experimental, donde el objetivo principal es validar el funcionamiento del sistema y verificar la estabilidad de las variables dentro de rangos óptimos. Las mediciones obtenidas son comparadas con valores de referencia establecidos sobre cultivos hidropónicos, permitiendo evaluar la pertinencia del diseño y la correcta parametrización del sistema automatizado.

Durante la fase inicial del cultivo se identificó la necesidad de incrementar la exposición directa a la luz, ya que una iluminación insuficiente generó alargamiento excesivo del tallo y una coloración amarillenta en las hojas, síntomas característicos de la etiolación. Como respuesta a esta condición, se implementó el uso de espuma de poliuretano en cada vaso que contenía las plántulas, lo cual permitió mejorar el soporte mecánico, estabilizar la posición del tallo y favorecer una distribución más adecuada de la luz en las primeras etapas de desarrollo.

Asimismo, el control y seguimiento continuo de variables críticas como el pH de la solución nutritiva, la temperatura ambiente y la concentración de nutrientes medida en TDS resultó determinante para alcanzar una lechuga de buena calidad. En este sentido, la recirculación constante de la solución nutritiva garantizó una mezcla homogénea, correctamente oxigenada y estable, lo que contribuyó a un crecimiento uniforme y sostenido del cultivo durante todo su ciclo productivo.

Por otra parte, el cultivo desarrollado en interiores permitió un control total del entorno, lo que evitó la aparición de plagas y la exposición a insectos o patógenos comunes en sistemas a cielo abierto. Esta condición, sumada a la estabilidad de los parámetros ambientales y nutricionales, favoreció un desarrollo saludable de las plantas. Adicionalmente, se evidenció que el sistema hidropónico permitió reducir significativamente el tiempo de cultivo de la lechuga, alcanzando ciclos de aproximadamente 30 a 35 días, en contraste con el cultivo tradicional en suelo, que suele extenderse entre 45 y 60 días y presenta una mayor dependencia de los factores climáticos.

Desde el punto de vista técnico y académico, el proyecto demostró la viabilidad de un sistema hidropónico automatizado para el cultivo de lechuga en ambiente controlado, utilizando

microcontroladores como núcleo del proceso. La integración funcional de sensores de pH, TDS, temperatura y calidad del aire, junto con actuadores hidráulicos como bombas y electroválvulas, permitió un monitoreo preciso y continuo de las variables críticas del cultivo. En este contexto, el uso de la plataforma Arduino Leonardo proporcionó una arquitectura flexible, económica y escalable, cumpliendo con los objetivos planteados y evidenciando su capacidad para soportar sistemas hidropónicos automatizados de bajo costo y alto desempeño. 111

Desde el enfoque electrónico, se concluye que la adecuada selección de módulos relé y componentes eléctricos es fundamental para garantizar la seguridad, confiabilidad y vida útil del sistema. Las pruebas realizadas permitieron identificar limitaciones en el hardware y resaltar la importancia de una verificación detallada, así como de una separación clara entre el sistema de control y el sistema de potencia. Estos resultados fortalecen la comprensión práctica de la automatización aplicada a entornos agrícolas y evidencian la relevancia de un diseño electrónico integral cuando se integran sensores, actuadores y sistemas de control en un sistema hidropónico.

Para terminar, desde el ámbito agronómico, los resultados obtenidos confirman que el mantenimiento de rangos adecuados de pH, TDS, temperatura y calidad del aire favorece el desarrollo fisiológico saludable de la lechuga y contribuye a un uso más eficiente del agua y de la solución nutritiva. La automatización del sistema reduce significativamente la intervención manual y minimiza errores operativos, representando una ventaja importante frente a sistemas hidropónicos tradicionales de manejo manual o semiautomático. Además, el diseño modular implementado facilita la expansión y adaptación del sistema, permitiendo la integración de nuevos sensores o la actualización de los existentes sin necesidad de una reestructuración completa, lo cual incrementa su aplicabilidad y sostenibilidad.

Como trabajo futuro, se considera relevante implementar el sistema de iluminación artificial mediante el uso de luminarias LED especializadas para cultivo, con control automático de intensidad y fotoperiodo. Esto permitiría optimizar aún más el crecimiento de las plantas, especialmente en las etapas iniciales, y reducir los problemas asociados a la deficiencia lumínica. De igual manera, la incorporación de sensores adicionales, como medición de conductividad eléctrica (EC) y sensores de humedad relativa, permitiría un control ambiental más completo y preciso.

Adicionalmente, se propondría el desarrollo de una plataforma de monitoreo remoto que permita visualizar en tiempo real las variables del sistema a través de una aplicación web o móvil. La integración de conectividad IoT facilitaría el registro histórico de datos, el análisis de tendencias y la toma de decisiones basadas en información cuantitativa. Este enfoque no solo mejoraría la eficiencia operativa del sistema, sino que también ampliaría su aplicabilidad a escalas mayores y a proyectos de investigación o producción hidropónica con fines comerciales y académicos.

Aerosphere. (2026) ¿Qué niveles de CO2 son peligrosos?

https://aerospheremonitoring.com/es/blogs/news/what-co2-level-is-dangerous#:~:text=Table_title:%20C%C3%B3mo%20saber%20si%20has%20estado%20expuesto,dolor%20de%20cabeza%2C%20dificultad%20para%20respirar.%20%7C

Ahn, D. H., & Ikeda, H. (2004). Effects of pH and concentration of nutrient solution on growth of hydroponically cultured Chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler). *Horticultural Research (Japan)*, 3(2), 191–194.

<https://agris.fao.org/search/en/providers/122558/records/6472448808fd68d546004a8a>

Álvarez, L. (2021). Efectos del cambio climático en la salud pública, 2015–2020: Una revisión sistemática. *Revista Española de Salud Pública*.

https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272021000100190

Arduino CC. (2024). Libraries. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/>

Aulestia, E., & Capa, D. (2020). Una mirada hacia la inseguridad alimentaria sudamericana. *Ciencia & Salud Colectiva*, 25(7), 2507–2517. <https://www.scielosp.org/article/csc/2020.v25n7/2507-2517/>

Autodesk Tinkercad. (2021). Official guide to Tinkercad Circuits.

<https://www.tinkercad.com/blog/official-guide-to-tinkercad-circuits>

Autodesk Tinkercad. (2024). Diseña componentes electrónicos. <https://www.tinkercad.com/circuits>

Ávila, H. (2019). Agricultura urbana y periurbana: Reconfiguraciones territoriales y potencialidades en torno a los sistemas alimentarios urbanos.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?Código=8748784>

Ayres Laporta, J. I. (2023). Crecimiento y consumo de nutrientes de lechuga y rúcula en sistema hidropónico NFT [Tesis de pregrado, Universidad de la República, Uruguay]. Colibrí.

cebollita de hoja en sistema hidropónico con nutrición sintética y orgánica. *Revista Científica El Surco*. <https://revistas.unc.edu.py>

Beermann, J., et al. (2019). Monitoreo de un sistema hidropónico NFT a escala usando arquitectura Arduino. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 36(2), 147–160.

https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822018000200147

Cevallos Mendoza, M. R. (2020). Aplicación de soluciones nutritivas en variedades de lechuga en cultivo hidropónico bajo el sistema NFT [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador]. Repositorio UTC.

Ciladi – Centro de investigación Latinoamericana para el desarrollo. (2024). Fomento de la agricultura sostenible mediante cultivos hidropónicos en la ciudad de Loja. <https://ciladi.org/wp-content/uploads/ELECTRONICA-DESARROLLO-AMBIENTAL-VF-DIGITAL.pdf>

Colombia Verde. (2026). Beneficios de los cultivos hidropónicos.

<https://colombiaverde.com.co/geografia/agricultura/beneficios-de-los-cultivos-hidroponicos>

Concejo de Bogotá. (2022). Bogotá entre las ciudades con mayor riesgo por el cambio climático.

<https://concejodebogota.gov.co/bogota-entre-las-ciudades-con-mayor-riesgo-por-el-cambio-climatico/cbogota/2019-02-21/143027.php>

Cortez Lázaro, R. A. (2023). Biofortificación del cultivo hidropónico de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) con hierro [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú]. Alicia.

Departamento Nacional de Planeación. (2023). Seguridad alimentaria y nutricional.

https://www.dnp.gov.co/LaEntidad_/subdireccion-general-prospectiva-desarrollo-nacional/direccion-desarrollo-social/Paginas/seguridad-alimentaria-y-nutricional.aspx

Electronilab. (2024). Arduino UNO R3 con chip CH340 compatible.

<https://electronilab.co/tienda/arduino-uno-r3-con-chip-ch340-compatible/>

Electronilab. (2024). Bomba de agua sumergible 9–12 VDC 500L/h.

[https://electronilab.co/tienda/bomba-de-agua-sumergible-9-12 VDC-500lh/](https://electronilab.co/tienda/bomba-de-agua-sumergible-9-12-VDC-500lh/)

Electronilab. (2024). Bombillo LED 9W cultivo 380–780 nm full spectrum 110V plantas.

Electronilab. (2024). Display LCD 16x2 con backlight azul conversor I2C PCF8574.

<https://electronilab.co/tienda/display-lcd-16x2-con-backlight-azul-conversor-i2c-pcf8574/>

Electronilab. (2024). Electroválvula válvula solenoide agua 12 V DC.

<https://electronilab.co/tienda/electrovalvula-valvula-selenoide-agua-12v-dc-12/>

Electronilab. (2024). Ethernet Shield con Wiznet W5100 para Arduino.

<https://electronilab.co/tienda/ethernet-shield-con-wiznet-w5100-internet-para-arduino/>

Electronilab. (2024). Mini bomba aire vacío 12 VDC. [https://electronilab.co/tienda/mini-bomba-aire-vacio-12 VDC/](https://electronilab.co/tienda/mini-bomba-aire-vacio-12-VDC/)

Electronilab. (2024). Mini bomba de agua DC 3–12V RS-360SH. <https://electronilab.co/tienda/mini-bomba-de-agua-dc-3-12v-rs-360sh/>

Electronilab. (2024). Módulo relé 4 canales salidas optoacopladas 12V.

<https://electronilab.co/tienda/modulo-rele-4-canales-salidas-optoacopladas-12v-selector-de-nivel/>

Electronilab. (2024). Módulo sensor de temperatura y humedad DHT11.

<https://electronilab.co/tienda/modulo-sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11/>

Electronilab. (2024). Placa I2C adaptadora LCD1602 PCF8574. <https://electronilab.co/tienda/placa-i2c-adaptadora-lcd1602-pcf8574/>

Electronilab. (2024). Regleta conector profesional hembra 2.54 mm.

<https://electronilab.co/tienda/regleta-conector-profesional-hembra-2-54mm-40-x-1-pines/>

- Electronilab. (2024). Sensor analógico de pH de 0–14. <https://electronilab.co/tienda/sensor-analogico-de-ph-de-0-14/>
- Electronilab. (2024). Sensor de calidad de aire MQ-135. <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-calidad-de-aire-mq-135/>
- Electronilab. (2024). Sensor medidor TDS sólidos disueltos totales. <https://electronilab.co/tienda/sensor-medidor-tds-solidos-disueltos-totales-calidad-agua-ppm/>
- Electronilab. (2024). Sensor vertical de nivel de agua. <https://electronilab.co/tienda/sensor-vertical-de-nivel-de-agua-plastico-flotador-interruptor/>
- Electronilab. (2024). Ventilador 8025 12 VDC 80x80x25 mm. [https://electronilab.co/tienda/ventilador-8025-12 VDC-80x80x25-mm/](https://electronilab.co/tienda/ventilador-8025-12-VDC-80x80x25-mm/)
- Ezziddine, M., Liltved, H., & Seljåsen, R. (2021). Hydroponic lettuce cultivation using organic nutrient solution from aerobic digested aquacultural sludge. *Agronomy*, 11(8), 1484. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/8/1484>
- Ezziddine, M., Liltved, H., & Seljåsen, R. (2021). Nutrient solution dynamics and yield of lettuce (*Lactuca sativa*) in an EC-controlled recirculating hydroponic system. *Acta Horticulturae*, 1305, 53. https://www.actahort.org/books/1305/1305_53.htm
- Ferretrónica. (2024). Buzzer activo 12V tipo chicharra. <https://ferretronica.com/products/buzzer-activo-12v-zumbador-tipo-chicharra>
- Figuroa, C. (2023). La automatización en la agricultura colombiana: ¿Un nuevo reto para el país? *Revista Industrial*, 21–26. <https://caoba.sanmateo.edu.co/ojs/index.php/industrial/article/view/197/168>

From Nativo. (2024). Plántula de lechuga hoja de roble verde y morada.

117

<https://fromnativo.com/producto/plantula-de-lechuga-hoja-de-roble-verde-y-morada-unidad/>

García, K. (2022). Hidropónicos: Agricultura sostenible para el ahorro de agua.

<https://www.bbva.ch/noticia/hidroponicos-agricultura-sostenible-para-el-ahorro-de-agua/>

González, E., & Meira, P. E. (2020). Educación para el cambio climático: ¿Educar sobre el clima o para el cambio? *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 25(2), 157–176.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-26982020000200157

González, M. (2021). ¿Qué es la agricultura sostenible? <https://ecosiglos.com/agricultura-sostenible/>

Growace. (2026). pH and PPM: Knowing What Your Plants Are Eating and How Much They Can Handle. <https://growace.com/blogs/learning-center/ph-and-ppm-knowing-what-your-plants-are-eating-and-how-much-they-can-handle>

Groots. (2022). La agricultura vertical ayuda a fortalecer la seguridad alimentaria y combatir el cambio climático. <https://groots.eco/agricultura-vertical-seguridad-alimentaria>

Hidroponia industrial. (2023). Hidroponía urbana: una tendencia que llegó para quedarse.

<https://hidroponiaindustrial.com/2023/02/09/hidroponia-urbana-una-tendencia-que-llego-para-quedarse/#:~:text=La%20hidropon%C3%ADa%20urbana%20es%20una,cultivos%20propios%20en%20propiedades%20urbanas.>

Homecenter. (2024). Tubo sanitario 2" x 1 m. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/373407/tubo-sanitario-2-x-1m/373407/>

Iboca. (2026). Índice bogotano de calidad del aire. <http://iboca.ambientebogota.gov.co/mapa/>

Infobae. (2023). El 19% de la población de Bogotá padece hambre.

<https://www.infobae.com/colombia/2023/09/20/el-19-de-la-poblacion-de-bogota-padece->

hambre/#:~:text=19%25%20de%20la%20poblaci%C3%B3n%20de%20Bogot%C3%A1%20se,u
na%20dieta%20lim%C3%ADtrofe%2C%20el%2085%25%20restante%20logra

Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. (2022). Política de seguridad alimentaria y nutricional.

<https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/politica-seguridad-alimentaria>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Escenarios de cambio climático.

<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/escenarios-cambio-climatico>

Khodijah, N. S., & Kusmiadi, R. (2022). The growth of lettuce (*Lactuca sativa*) hydroponically in simple wick system on various types of nutrient composition. *Jurnal Agronomi Tanaman Tropika*, 3(2).

<https://doi.org/10.36378/juatika.v3i2.1366>

Luis Llamas. (2026). Detector de gases con Arduino y la familia de sensores MQ.

<https://www.luisllamas.es/arduino-detector-gas-mq/>

Marín, C. (2021). Niveles de micronutrientes en niños escolares colombianos e inseguridad alimentaria.

<https://www.scielo.org/article/csc/2020.v25n7/2507-2517/>

Martínez, P., et al. (2022). Huerta urbana comunitaria: Más que lechugas entre cemento. *Producción social de territorios saludables. Revista Ciencia y Sociedad*, 22(1), 409–426.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-80312022000100409

Minambiente. (2023). ¿Cómo afectaría el cambio climático a Colombia en los próximos años?

<https://www.minambiente.gov.co/como-afectaria-el-cambio-climatico-a-colombia-en-los-proximos-anos/>

Montaño, M., et al. (2023). Diseño y despliegue de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos. *Revista Científica Senescyt*, 2(2), 9–21.

http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-860X2023000200009

(*Lactuca sativa* L.) en el sistema hidropónico de raíz flotante [Tesis de pregrado, Universidad de Talca, Chile].

Mundo hidroponía. (2025). Todo sobre el pH en Hidroponía: Qué es, cómo medirlo y por qué es clave para tus plantas. <https://www.mundohidroponia.com.ar/todo-sobre-el-ph-en-hidroponia-que-es-como-medirlo-y-por-que-es-clave-para-tus-plantas/#:~:text=%F0%9F%91%89%205.5%20y%206.5,el%20aluminio%20y%20el%20mangan eso.>

Nutrihydro Plant Nutrients. (2026). NH Lettuce Formula with Companion Products Application Guide. https://nutrihydro.com/nh-lettuce-formula-with-companion-products-application-guide/?utm_source=chatgpt.com&v=03b45d62a043

Ortiz Anguizaca, C. D. (2021). Cultivo hidropónico de cebollín, culantro, lechuga, albahaca y cebolla: Una forma casera de producción. Universidad Politécnica Salesiana.

Pérez Melián, G., & Luque-Escalona, A. (1974). Cultivo hidropónico de lechugas: I. Nutrición. Caja Insular de Ahorros de Gran Canaria.

P'unguari Juáta – Revista multidisciplinaria de ciencias. (2025). Seguridad alimentaria en la industria 4.0: control y monitoreo de cultivo hidropónico mediante microcontrolador ESP-32. <https://www.cdaltamirano.tecnm.mx/revista/index.php/pj/article/view/25/21>

TEC – Tecnología en marcha. (2018). Monitoreo de un sistema hidropónico NFT a escala usando arquitectura arduino. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v31n2/0379-3982-tem-31-02-147.pdf>

Sigma Electrónica. (2024). Jumper. https://www.sigmaelectronica.net/?s=jumper&post_type=product

- Sinc – Ciencia contada en español. (2026). Lechugas urbanitas: alimento y control de la calidad del aire. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Lechugas-urbanitas-alimento-y-control-de-la-calidad-del-aire>
- Study. (2021). Nutrient solution deprivation as a tool to improve hydroponics sustainability. *Agronomy*, 11(8), 1469. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/8/1469>
- Study. (2022). Dynamics of micro and macronutrients in a hydroponic NFT system under lettuce cultivation. *Journal of Plant Nutrition*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38947472/>
- Study. (2024). The use of biostimulants as a key to sustainable hydroponic lettuce farming under saline water stress. *BMC Plant Biology*, 24, 808. <https://bmcplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-024-05520-8>
- Vistronica. (2024). Módulo relé de 1 canal. <https://www.vistronica.com/potencia/modulo-rele-de-1-canal-detail.html>
- UNDES- Universidad de Santander. (2022). Uso del simulador Tinkercad como recurso para el fortalecimiento de las competencias tecnológicas y el pensamiento investigativo en media técnica en electrónica. <https://repositorio.udes.edu.co/server/api/core/bitstreams/185e5653-59ee-44ac-a756-8fad8f6520c6/content>
- UNMSM - Universidad Nacional Mayor de San Marcos. (2025). *Optimización de la producción de hortalizas en entornos de hidrocultivo mediante inteligencia artificial: una revisión de la literatura*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/7/3103>
- UPS Ecuador. (2022). *Automatización de un sistema de riego hidropónico en una granja vertical mediante comunicación*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24016/1/UPS-GT004156.pdf>

Sheet. https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2020-08/Carbon-

Dioxide.pdf#:~:text=Los%20niveles%20de%20CO2%20en%20el%20aire,legar%20a%20600%

2D900%20ppm%20en%20%20C3%A1reas%20metropolitanas.