

Artículo

Diseño y construcción de un sistema de cultivo hidropónico autónomo asistido por energía solar fotovoltaica

Itzel Jiménez López ¹, Jorge Alberto Azuara Jiménez ^{2*}, Donaji Jiménez Islas ³, Miriam Edith Pérez Romero ⁴

¹ SINERGIC Energy Solutions, Área de Ingeniería, Querétaro, México.

² Tecnológico Nacional de México/Campus Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, División de Ingeniería Industrial, México

³ Tecnológico Nacional de México/ Campus Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, División de Ingeniería en Energías Renovables, México

⁴ Tecnológico Nacional de México/ Campus Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, División de Ingeniería Industrial, México

* Correspondencia: jazuara@iteshu.edu.mx

Resumen: La escasez hídrica y la dependencia de energía convencional en regiones semiáridas limitan el desarrollo de la agricultura de autoconsumo. El objetivo de esta investigación fue diseñar, dimensionar y construir un sistema hidropónico autónomo y sustentable para autoconsumo en regiones semiáridas. Se implementó la Técnica de Película Nutritiva (NFT) para producir lechuga (*Lactuca sativa*) mediante un diseño modular. El prototipo integró un sistema fotovoltaico aislado (SFVA), modelado previamente en entornos CAD (Vectary, AutoCAD y SolidWorks), junto a un control automatizado con Arduino UNO® para la gestión de riego y medición de variables ambientales. Como resultado, el sistema cubrió una demanda energética diaria de 68.42 Wh, gestionando un ciclo de bombeo intermitente de 10 minutos por hora durante 12 horas al día. Se concluye que la integración tecnológica y el correcto dimensionamiento del SFVA validan la viabilidad y autonomía total del sistema, mitigando la dependencia energética convencional en la agricultura urbana.

Keywords: Agricultura urbana; Automatización de riego; Sistema fotovoltaico aislado; Técnica de Película Nutritiva (NFT).

Citar este trabajo: Jiménez-López, I.; Azuara-Jiménez, J.A.; Jiménez-Islas, D., Pérez-Romero M. E. Título; Diseño y construcción de un sistema de cultivo hidropónico autónomo asistido por energía solar fotovoltaica. RELITEC'S 2026, 9^a, edición, Vol. 1 ISSN 2395-972X

Recibido:20-07-2026
Aceptado:22-07-26
Publicado: 31-07-2026

1. Introducción

La agricultura global contemporánea enfrenta una triple amenaza convergente: el cambio climático puede reducir la producción de alimentos hasta un 30% según escenarios contemporáneos (Wegren & Тропук, 2020), y la escasez hídrica estructural ya afecta a aproximadamente 2200 millones de personas (García-Salazar et al., 2023) comprometiendo la capacidad del sector para alimentar a los 9000 millones de habitantes proyectados hacia 2050, quienes demandarán al menos un 60% más de alimentos (Schiaffini-Aponte et al., 2023). En este contexto crítico, el sector absorbe cerca del 70% de las extracciones mundiales de agua dulce (Oberlé et al., 2019), pero solo el 17% del agua aplicada al suelo es aprovechada efectivamente por las raíces (P. et al., 2023). Frente a este panorama, la hidroponía emerge como una alternativa técnica validada capaz de reducir el consumo hídrico hasta un 98% mediante sistemas de recirculación cerrados y recuperación de la evapotranspiración (Osman et al., 2023; Pomoni et al., 2023), posicionándose como una herramienta clave para garantizar la seguridad alimentaria en zonas con suelos degradados o limitaciones hídricas crecientes (Laitón & Torres, 2025; Olmos et al., 2024).

La automatización es un pilar operativo decisivo para optimizar los cultivos hidropónicos, ya que permite el monitoreo en tiempo real de variables críticas como temperatura, pH y flujo de agua mediante sensores embebidos, contribuyendo indirectamente a reducir el consumo hídrico hasta en un 90% (Palomino-Resendiz et al., 2025). Esta supervisión, complementada con conectividad LoRaWAN o NB-IoT, habilita el telecontrol del riego y la dosificación desde nodos remotos, condición indispensable para llevar la hidroponía a comunidades aisladas y a hogares autosustentables (Palomino-Resendiz et al., 2025). Sin embargo, la paradoja oculta reside en que la mayoría de los sistemas automatizados dependen todavía de la red eléctrica convencional, cuyo factor de emisión térmico traslada al cultivo la huella de carbono que la hidroponía precisamente busca evitar. Esta contradicción se vuelve crítica en zonas rurales con infraestructura deficiente, donde el elevado consumo energético de las bombas de recirculación —que representan la mayor parte de la carga operativa frente al consumo marginal de los sensores y microcontroladores (Ng et al., 2023; Waluyo et al., 2023)— convierte la promesa de sostenibilidad en un compromiso operativo con fuentes no renovables (Palomino-Resendiz et al., 2025).

El desafío técnico radica, por tanto, en implementar estrategias de control inteligente (como lógica difusa o ciclos de operación optimizados) que ajusten el riego dinámicamente según las necesidades hídricas reales, reduciendo el tiempo de operación de las bombas y minimizando la demanda de almacenamiento energético (Tatas et al., 2022; Vega et al., 2023). La evidencia experimental disponible indica que el potencial renovable recolectado emplea apenas un 10% de la energía colectada, lo que refuerza la viabilidad de sustituir la red convencional por arquitecturas fotovoltaicas off-grid, vía robusta para conciliar productividad agronómica y descarbonización del sistema alimentario mediante energía limpia, baterías de ciclo profundo y control inteligente y autónomo (Velázquez, 2025; Palomino-Resendiz et al., 2025). La integración de sistemas fotovoltaicos en estas arquitecturas no solo asegura la independencia operativa frente a las limitaciones de la red eléctrica convencional, sino que alcanza una autonomía energética de hasta el 92% en diversas configuraciones de microrredes aisladas (Rana et al., 2025).

La automatización mediante sistemas IoT constituye hoy un eje vertebral para alcanzar la autonomía operativa de los cultivos hidropónicos NFT, cuando se integran plataformas embebidas de bajo costo y conectividad estandarizada. Una revisión sistemática de 74 estudios publicada en 2025 identifica que las soluciones predominan en arquitecturas con microcontroladores de código abierto y módulos WiFi, orientadas al monitoreo de pH, conductividad eléctrica y temperatura (Sportelli et al., 2025). Trabajos fundacionales sobre NFT han implementado prototipos con ESP32 programado en Arduino IDE, capaces de registrar durante tres meses las variaciones de temperatura, humedad relativa y pH de la solución nutritiva, y accionar actuadores de riego desde una interfaz IoT en Arduino Cloud (Pichoasamin et al., 2022). Arquitecturas paralelas han empleado Raspberry Pi 4B con Arduino Uno para integrar paneles de control con pantallas táctiles, generando bases de datos en SQLite que describen el microclima del cultivo a lo largo del ciclo productivo de la lechuga (Porras et al., 2022).

En el ámbito nutricional, sistemas recientes han recurrido al Arduino Uno R3 para ajustar en tiempo real las proporciones de pH y conductividad eléctrica (CE), con resultados validados en *Brassica rapa chinensis* (Ching et al., 2025), mientras revisiones paralelas han estimado que las bombas dosificadoras accionadas por lecturas de CE y pH son práctica estándar en granjas NFT medianas (Jain & Kaur, 2024). La integración con NodeMCU ESP8266 y aplicaciones Android permite la supervisión remota continua de granjas verticales con sensores de pH y CE acoplados a Arduino Mega (Alotaibi et al., 2023). La evidencia 2020-2026 confirma que el control autónomo basado en

microcontroladores es una práctica madura aplicable a comunidades sin acceso a red eléctrica convencional (Kumara et al., 2023).

La integración de sistemas solares fotovoltaicos aislados off-grid en la agricultura de precisión a pequeña escala ha tenido un énfasis particular en el dimensionamiento de bancos de baterías y arreglos fotovoltaicos capaces de soportar cargas dinámicas asociadas al bombeo, sensado y control embebido. Una evaluación publicada en 2025 reporta un sistema hidropónico vertical alimentado por un banco de baterías de 50 Ah, cuyo consumo diario medio asciende a 200 Wh y garantiza 48 horas de autonomía en condiciones óptimas de irradiancia (Mujiyanti et al., 2025). En paralelo, Kabakchieva et al. establecieron directrices prácticas para dimensionar módulos fotovoltaicos, inversores y almacenamiento en sistemas PV-híbridos destinados a riego agrícola; sus simulaciones en PVSyst v.8 demostraron que la potencia pico debe sobredimensionarse al menos un 80 % cuando el consumidor opera cinco horas diarias, mientras la capacidad de la batería debe ajustarse según la autonomía requerida (Kabakchieva et al., 2025). Complementariamente, Palomino-Resendiz et al. diseñaron un prototipo hidropónico NFT con paneles de 100 W, baterías de 100 Ah, inversor de 500 W y bomba de 25 W que opera menos de una hora diaria, alcanzando hasta cuatro días de autonomía (Palomino-Resendiz et al., 2025).

Aunque la automatización IoT ha ganado madurez en los cultivos hidropónicos recirculantes, persisten limitaciones operativas y económicas que restringen su despliegue masivo en zonas rurales, la mayoría de las plataformas publicadas siguen siendo experimentales, sin certificaciones de interoperabilidad que aseguren continuidad operativa completa (Sportelli et al., 2025).

A esta limitación energética se suma una restricción de escala. Mientras el mercado internacional ofrece sistemas NFT comerciales para invernaderos medianos (Jain & Kaur, 2024) y plataformas verticales smart con conectividad WiFi/NB-IoT (Alotaibi et al., 2023), la oferta mexicana de sistemas hidropónicos pequeños orientados a huertos domésticos o jardines urbanos es prácticamente inexistente, concentrada exclusivamente en prototipos académicos como el jardín hidropónico NFT solar del IPN (Palomino-Resendiz et al., 2025) o en extensiones hidroagrícolas periurbanas con limitaciones de capital, semilla y gestión documentadas para Querétaro (Villavicencio-Valdez et al., 2023). Los huertos familiares tradicionales de localidades michoacanas han demostrado, en cambio, una notable capacidad adaptativa ante la escasez hídrica mediante cosecha de lluvia y reciclaje doméstico, pero no recurren aún a la hidroponía automatizada (Moreno & Sosa-Perdomo, 2025). Cabe destacar que en contextos de electrificación restringida —como Haití, donde solo 20–40 % de la población rural accede a la red eléctrica convencional— la viabilidad económica de los sistemas automatizados solo se alcanza mediante diseños simplificados no circulantes que prescinden de bombeo continuo (Vega et al., 2023). Por tanto, la automatización hidropónica en México requiere arquitecturas que integren explícitamente la gestión dinámica de la carga, dimensionamientos fotovoltaicos conservadores y reducciones de costo que democratizen su acceso en el ámbito del traspaso rural.

Aunque ha habido avances, todavía no existe un sistema completamente autónomo que mejore al mismo tiempo la eficiencia energética, el uso del agua y la rentabilidad económica en condiciones de clima extremadamente variable. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo diseñar y construir un sistema hidropónico autónomo que optimice el nexo agua-energía-alimentos mediante una gestión inteligente de cargas, buscando elevar la sostenibilidad agrícola en entornos rurales sin acceso a la red eléctrica (Palomino-Resendiz et al., 2025, p. 1), (López et al., 2019). democratizando el acceso a tecnologías de producción intensiva mediante la reducción de costos operativos y de inversión inicial.

La dimensión socioeconómica del presente proyecto adquiere relevancia particular al situarla en el contexto mexicano. La hidroponía representa ya el 50 % de los cultivos protegidos nacionales, evidenciando un mercado en expansión (Lazo & Gonzabay, 2020). Sin embargo, un estudio de mercado realizado en Saltillo, Coahuila sobre 213 329 viviendas habitadas documentó que el 72 % de la población desconoce la hidroponía, aunque manifiesta interés genuino tras una breve explicación, lo que confirma la demanda potencial desaprovechada (Hernández et al., 2017). Esta brecha de adopción se agrava al examinar la pequeña agricultura periurbana de Querétaro, donde se han reportado limitaciones crónicas de capital, semilla y gestión que restringen la tecnificación automatizada (Villavicencio-Valdez et al., 2023), y al constatarse en zonas indígenas de Zongolica, Veracruz, que la implementación de sistemas NFT no es aún factible debido a los altos costos que implica (Panzo et al., 2025).

En contraste, los invernaderos hidropónicos comerciales de media tecnología en Guanajuato —estudio de caso de 5,6 ha con tomate Roma durante el ciclo 2024— alcanzaron un margen neto del 14,40 %, rendimiento de 40,21 kg·m⁻² y margen operativo del 25,05 %, con 80 % de la producción destinada a exportación y 17 % al mercado nacional (Riva, 2025). Tales indicadores contrastan con la rentabilidad potencial de la economía familiar hidropónica de traspatio: huertos biointensivos del estado de Hidalgo han demostrado capacidad productiva aun en suelos áridos, cosechando pepinos, col morada, poro, melón, fresas, cebollas de hasta medio kilogramo, acelgas, espinacas y cilantro para autoconsumo (Gutiérrez, 2023). Paralelamente, los huertos familiares michoacanos han desplegado estrategias adaptativas de cosecha de lluvia y reciclaje doméstico frente a la escasez hídrica, aunque todavía no incorporan la hidroponía automatizada (Moreno & Sosa-Perdomo, 2025). En conjunto, estos hallazgos sugieren que el sistema propuesto debe diseñarse con sobredimensionamientos fotovoltaicos conservadores, control embebido de bajo costo y estrategias de difusión que reduzcan la brecha de conocimiento del 72 % documentada en el norte del país, alineando competitividad comercial periurbana con seguridad alimentaria del traspatio semiárido mexicano.

Este trabajo tiene como objetivo principal diseñar, dimensionar y construir un sistema de cultivo hidropónico autónomo que use energía solar, pensado para hogares y patios en regiones semiáridas de México con poco acceso a la electricidad tradicional. La propuesta integra tres componentes técnicos que operan de manera conjunta: un subsistema de cultivo hidropónico NFT de baja escala, un subsistema fotovoltaico con almacenamiento, y un subsistema de control basado en un microcontrolador de bajo costo que automatiza el sistema de riego, así como la medición de variables como temperatura ambiente, temperatura de la solución y humedad relativa.

2. Materiales y Métodos

2.1 Sistema de cultivo hidropónico

Para el cultivo hidropónico se eligió un sistema denominado NFT, que involucra un conducto a través del cual se circula una solución de nutrientes de manera periódica, ajustada a las demandas del cultivo en función de la fase fenológica y las condiciones ambientales. En este sistema, las plantas se sitúan en la parte superior, garantizando que las raíces permanezcan en contacto directo con la solución.

El sistema NFT ha sido concebido para hortalizas de tamaño reducido o rastrero, tales como: lechuga, acelga, plantas aromáticas, fresa, tomate, entre otros. Para este proyecto fue seleccionado el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*), la cual pertenece a la familia de las asteráceas, es una hortaliza de hoja apreciada tanto en la cocina como en la medicina popular (Khare, 2004; Yap y Teo, 2019). Su inclusión en el sistema provee una biomasa

rica en fitonutrientes, folato, antioxidantes (como el betacaroteno) y minerales esenciales para el organismo (Noumedem et al., 2017). Asimismo, dado que su ciclo biológico es de apenas 30 a 35 días, facilita una rotación sumamente eficiente del cultivo dentro de los sistemas hidropónicos de recirculación (Kovácsné Madar et al., 2019), además de que es muy adaptable al clima de la región de Huichapan, Hgo.

En el proceso del cultivo, se utilizó una solución nutritiva que facilitó el crecimiento de la lechuga, tal como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Componentes de la solución nutritiva

Sal/reactivo	Cantidad (g)
Nitrato de Calcio	99
Sulfato de Magnesio	49.5
Nitrato de Potasio	9.13
Dihidrógeno Fosfato de Potasio	13.6
Sulfato de Potasio	45.13
Quelato de Hierro	3
Sulfato de Manganeso	0.19
Ácido Bórico en polvo	0.25
Sulfato de zinc	0.03
Sulfato de cobre	0.007
Molibdato de Sodio	0.0012

Aclaración: Cantidades para una solución de 100L de agua.

*Elaboración propia.

2.2 Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFVA)

Se consideraron diferentes componentes en el sistema hidropónico los cuales requerían energía, el diseño del sistema eléctrico integrado al cultivo hidropónico se dimensionó para que la generación fotovoltaica cubriera la demanda energética diaria de los sistemas de bombeo, medición y visualización de variables.

Los criterios base empleados para el dimensionamiento del SFVA fueron los siguientes:

- Energía requerida por el sistema.
- Potencial del recurso solar en la zona de implementación.
- Dimensionado del sistema fotovoltaico aislado.

Se realizó un análisis del recurso solar disponible en la zona para llevar a cabo el cálculo del generador fotovoltaico. La zona se encuentra a 20.31° de latitud y -99.70° de longitud. De acuerdo con los datos provistos por la National Aeronautics and Space Administration (2026), la región registra una radiación solar promedio de 5.2 kWh/m²/día.

Aunado a los requerimientos energéticos, los criterios de dimensionamiento físico y estructural del dispositivo (distancias y diámetros) se determinaron en función del desarrollo fenológico del cultivo elegido. Debido a que la lechuga (*Lactuca sativa*) posee un diámetro de copa comercial promedio de 20 a 25 cm y un sistema radicular compacto, se definió un espaciamiento vertical de 20 cm entre niveles para evitar el sombreado

interfoliar, y un diámetro de 5 cm en las perforaciones de los canales de PVC (3 pulgadas) para garantizar el anclaje óptimo de los contenedores de soporte sin obstruir la película del flujo nutritivo.

Los equipos que se abastecen de energía fueron: bomba de agua sumergible, sensor de temperatura y humedad DTH22, sensor termopar tipo K, pantalla Liquid Crystal Display (LCD) y tarjeta Arduino UNO®. Al considerar su potencia y periodos de funcionamiento, además de la radiación recibida en la zona y el mes más crítico, se calculó la energía requerida: 68.42 Wh por día. El sistema de bombeo se programó para activarse de forma automática en intervalos de 10 minutos por cada hora, completando un ciclo operativo total de 12 horas diarias para asegurar el suministro continuo de la solución nutritiva al cultivo. La medición y visualización de las siguientes variables: temperatura y humedad relativa del ambiente, así como, la temperatura de la solución nutritiva se midió con una latencia de 10 segundos.

Para la recirculación y oxigenación del agua, se seleccionó una bomba sumergible de bajo consumo de potencia (24 W), bajo nivel de ruido y operación a una tensión de alternancia de 110-120 V, capaz de proporcionar una altura dinámica máxima de 2 m. A partir del recurso solar disponible en la zona, la potencia de los equipos y las horas de funcionamiento, se determinó la potencia del arreglo fotovoltaico mediante la Ecuación 1. En dicho cálculo se integraron la energía total requerida (E) y el factor de pérdidas globales del sistema (%pérdidas), el cual contempla la eficiencia de los módulos, la descarga de las baterías y los rendimientos individuales del inversor y el controlador de carga.

$$P_{PTV} = \frac{(E) + (E)(\%pérdidas)}{HSP} \quad (1)$$

Con el valor de la potencia del sistema fotovoltaico, se calculó el número de módulos fotovoltaicos (ecuación 2):

$$N_T = \frac{P_{PTV}}{P_{panel}} \quad (2)$$

El banco de baterías se dimensionó de acuerdo a la ecuación 3, haciendo uso de la energía requerida del sistema (E), considerando pérdidas del sistema de 30% (%pérdidas), la tensión nominal de la batería (V_n) y una profundidad de descarga de la batería de 50% (P_d) para prolongar su vida útil.

$$C_{Sist.bat.} = \frac{[(E) + (E)(\%pérdidas)]}{(V_n)(P_d)} \quad (3)$$

Para conocer el número de baterías, se utilizó la ecuación 4, considerando la capacidad del sistema y la capacidad de una batería comercial de 18 Ah:

$$N_{Bat.} = \frac{C_{Sist.bat.}}{C_{Bat.}} \quad (4)$$

En cuanto al cálculo del regulador de carga (ecuación 5), se consultó la intensidad de corriente de cortocircuito de la ficha técnica del módulo fotovoltaico, en Amperes (I_{sc}) y, el número de ramas en paralelo del generador fotovoltaico (N_p), además de un factor de seguridad de 1.20.

$$I_R > (1.20)(I_{sc})(N_p) \quad (5)$$

Por último, se calculó el inversor mediante la ecuación 6:

$$Inversor = \frac{P_{Sist}}{OP_{80}} \quad (6)$$

Donde P_{Sist} , corresponde a la potencia total del sistema (Tabla 1), es decir, la suma de todas las potencias de los dispositivos en Watts (W), y un porcentaje de operación del inversor (OP_{80}) del 80%.

Para definir la inclinación de los módulos fotovoltaicos (β), se consideró la ecuación 7:

$$\beta = \phi + 10^\circ \quad (7)$$

Donde ϕ , se fijó en función de la latitud local con el propósito de optimizar la captación de radiación anual; de manera complementaria, este ángulo favorece el drenaje pluvial y la autolimpieza del panel, previniendo pérdidas por acumulación de polvo o agua.

2.3 Sistema de monitoreo de variables y control de bombeo

La medición de las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa se realizó mediante un sensor DHT22, instalado a la intemperie con una carcasa protectora y fijado directamente a la armadura del sistema hidropónico. Para el registro de la temperatura de la solución nutritiva, se empleó un sensor de contacto termopar tipo K, el cual se colocó sumergido en el interior de uno de los canales de cultivo. Las características de estos componentes se especifican en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los sensores de monitoreo ambiental y de fluido.

Sensor	Descripción
DHT22	Voltaje de Operación: 3V - 6V DC.
	Rango de medición de temperatura: -40°C a 80 °C.
	Precisión de medición de temperatura: $\leq \pm 0.5$ °C.
	Resolución Temperatura: 0.1°C.
	Rango de medición de humedad: De 0 a 100% RH.
	Precisión de medición de humedad: 2% RH.
Termopar tipo K	Resolución Humedad: 0.1%RH.
	Tiempo de sensado: 2s.
	Rango de temperatura de medición de 0 a 500 °C. Precisión: 0,2.
	Cable: línea trenzada de metal de 2 m. El alambre está hecho de alambre de fibra de vidrio blindado, el alambre puede soportar altas temperaturas de 600 °C.

*Elaboración propia.

Se implementó un sistema que recibe las lecturas de los sensores, permite la visualización de las variables medidas y controla el sistema de bombeo. Este módulo se basa en una tarjeta de adquisición de datos Arduino UNO®, la cual opera bajo una plataforma de hardware y software de código abierto. Las variables medidas se visualizan en una pantalla LCD de 16X2, mismas que se actualizan cada 10 segundos.

El sistema de bombeo se gestionó a través de la tarjeta de adquisición, es importante destacar que se integró una etapa de acoplamiento (constituida por un relevador), que garantiza el aislamiento eléctrico entre el módulo de control y la etapa de potencia.

Se programó la secuencia de encendido y apagado del bombeo, así como la visualización de los parámetros de cultivo en el IDE de Arduino.

2.4 Modelado del sistema en software de diseño asistido por computadora

Para el diseño de la estructura se seleccionó perfil tubular rectangular de acero de 1 pulgada (25.4 mm). La configuración geométrica se diseñó con cinco niveles verticales dispuestos con una separación de 20 cm. Los componentes principales a considerar para realizar el modelado fueron:

- Estructura de soporte del cultivo hidropónico.
- Reservorio de la solución nutritiva.
- Sistema de control de bombeo y medición de variables.
- Sistema solar fotovoltaico autónomo.

Se realizó el modelado 3D del prototipo en la herramienta en línea Vectary, lo que permitió tener un diseño paramétrico con la distribución de los componentes, estimación aproximada de las dimensiones y configuración del diseño modular. Posteriormente se diseñó en el software SolidWorks con las medidas y características finales.

Para definir y visualizar la conexión del sistema solar fotovoltaico, se diseñó el diagrama de componentes y sus conexiones en el software AutoCAD 2025.

2.5 Construcción y puesta en marcha

A partir del dimensionamiento fotovoltaico y de la selección del tipo de cultivo hidropónico, se adquirieron los componentes comerciales necesarios para llevar a cabo la construcción del prototipo.

Para ejecutar la construcción, se integraron los componentes del cultivo hidropónico, las partes del sistema fotovoltaico y los dispositivos para la medición de variables; para ello, se realizaron previamente pruebas por separado del sistema fotovoltaico, verificando que todos los dispositivos funcionaran adecuadamente.

Se comprobó la inexistencia de fugas en tuberías o bloqueos en las mangueras encargadas de distribuir la solución nutritiva al cultivo. Se ejecutó el código del programa para verificar que los tiempos de bombeo y la muestra de los parámetros se visualizaran de manera correcta.

La estructura del cultivo hidropónico se realizó a partir de la medición, corte y soldado del perfil tubular rectangular de una pulgada con una altura de 1.42 m y 0.80 m de ancho. Posteriormente, se posicionaron los cinco niveles de tubo PVC de 3 pulgadas de diámetro y 1.05 m de largo, con siete perforaciones de diámetro de 5 cm cada uno. En los extremos de la estructura, se instalaron, respectivamente, la línea de suministro para el ingreso de la solución nutritiva, y el tubo de drenaje para el retorno del flujo.

El banco de baterías, inversor y controlador de carga, se colocaron en un gabinete metálico para su protección a las condiciones climáticas.

Los módulos fotovoltaicos se ubicaron en una base construida a partir de perfil angular de ½ pulgada con una inclinación determinada por la latitud del lugar.

El sistema de control del bombeo y monitoreo de variables se colocó en un gabinete sujeto a la estructura principal del cultivo hidropónico.

3. Resultados

3.1 Sistema de cultivo hidropónico

El sistema de cultivo hidropónico fue dimensionado con cinco canales, cada uno con siete orificios, para colocar las plantas, depositadas en pequeños recipientes como un medio de sustento, ver Figura 1. Los canales, por su parte, se diseñaron para estar suspendidos sobre una estructura o caballete, que facilita el soporte de los tubos de PVC. Dado que el sistema requirió una circulación constante, se adaptó un sistema de bombeo. Este sistema se encargó de la distribución de la solución nutritiva por la tubería, para almacenarse y posteriormente recircularse. Este trabajo lo realizó una bomba que facilitó la oxigenación de la solución nutritiva a través de los canales de cultivo.

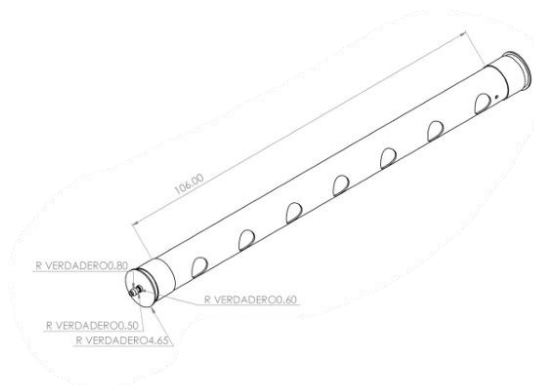


Figura 1. Diseño de la disposición del canal para depósito de plantas

Fuente: Elaboración propia

3.2 Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFVA)

El dimensionamiento del SFVA se determinó a partir de las ecuaciones descritas en la metodología y la demanda de carga estimada por los componentes eléctricos del prototipo. Con base en estos cálculos, se estableció una configuración integrada por dos módulos fotovoltaicos de 10 W encargados de la captación solar, un controlador de carga de 10 A de 12/24 V para la regulación del flujo de corriente, y un banco de almacenamiento compuesto por una batería de 12 V con una capacidad de 18 Ah. Finalmente, para la conversión de corriente directa a alterna y el suministro de potencia a la bomba, se integró un inversor con una capacidad nominal de 300 W garantizando la sustentabilidad y el funcionamiento continuo del sistema.

Las características técnicas de cada elemento del SFVA se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Ficha técnica y parámetros nominales de los componentes del SFVA.

Elemento	Características
Módulos fotovoltaicos	Material: silicio
	policristalino, Potencia: 10 W, Tensión de circuito abierto: 21.2 V, Corriente: 0.556 A, Dimensiones: 310*287*17 mm
Inversor	Potencia: 300 W, Rangos de tensión: 110 V a 220 V

Batería	Tensión de 12 V, capacidad de 18 Ah
---------	-------------------------------------

*Elaboración propia.

La conexión final de los componentes del SFVA, se estructuró de acuerdo con el diagrama eléctrico modelado en AutoCAD, mostrado en la Figura 2.

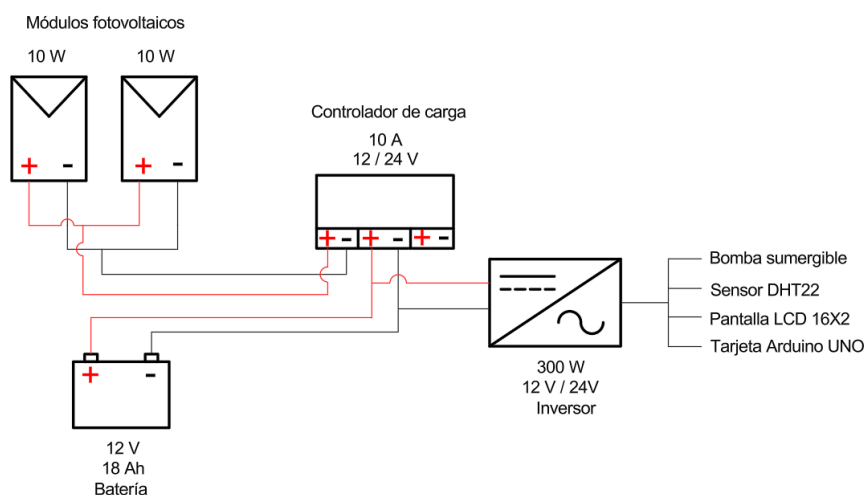


Figura 2. Diagrama de conexión del SFVA elaborado en AutoCAD 2025.
Fuente: Elaboración propia

3.3 Sistema de monitoreo de variables y control de bombeo

El comportamiento de operación del sistema se programó en el IDE de Arduino considerando la operación de los componentes y sus ciclos de trabajo. La Figura 3 muestra parte del código implementado en la tarjeta Arduino UNO® para la medición de variables, la visualización de lecturas y el accionamiento de la bomba.

```

Codigo_cultivo | Arduino IDE 2.3.10
File Edit Sketch Tools Help
Select Board

Codigo_cultivo.ino
1 //
2 *
3 * Sistema de cultivo hidropónico con energía solar
4 *
5 * Descripción: Automatización y monitoreo de variables críticas para un
6 * sistema hidropónico sustentable.
7 * - Monitoreo: Temperatura de solución (Tipo K), Temp. Ambiente y Humedad (DHT22).
8 * - Visualización: Pantalla LCD 16x2 con actualización cada 10 segundos.
9 * - Actuación: Bomba de recirculación activa 10 min/hora durante un ciclo de 12h.
10 *
11 */
12
13 #include <Wire.h> // librería para comunicación I2C
14 #include <LiquidCrystal_I2C.h> // librería para el manejo de la pantalla LCD I2C
15 #include <DHT.h> // librería para el sensor de temperatura y humedad DHT22
16 #include <max6675.h> // librería para el termopar Tipo K con amplificador MAX6675
17
18 // --- CONFIGURACIÓN DE PINES ---
19 #define DHTPIN 2 // Pin digital donde se conecta el DHT22
20 #define DHTTYPE DHT22 // Definimos el tipo de sensor como DHT22
21
22 int thermoDO = 3; // Pin SO del MAX6675
23 int thermoCS = 4; // Pin CS del MAX6675
24 int thermoCLK = 5; // Pin SCK del MAX6675
25
26 #define BOMBA_PIN 6 // Pin digital que controla el relé de la bomba
27
28 // --- INICIALIZACIÓN DE OBJETOS ---
29 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Instancia del sensor DHT22
30 MAX6675 thermopar(thermoCLK, thermoCS, thermoDO); // Instancia del termopar Tipo K
31 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // LCD en dirección 0x27, tamaño 16x2
32
33 // --- VARIABLES DE CONTROL DE TIEMPO (Milisegundos) ---
34 unsigned long prevDisplayMillis = 0; // Almacena el último tiempo de actualización del LCD
35 unsigned long prevRelojMillis = 0; // Almacena el tiempo para el segundero del sistema
36
37 // --- VARIABLES DEL RELOJ INTERNO ---
38 // Simulamos un reloj diario para cumplir el ciclo de 12 horas operativas de un día de 24 horas
39 int segundo = 0;
40 int minuto = 0;
41 int hora = 0;

```

Figura 3. Segmento de código en el IDE de Arduino

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4 se observa el circuito realizado para medir y visualizar los parámetros del cultivo (temperatura de la solución nutritiva, temperatura ambiente y humedad relativa), mediante los sensores tipo K, DHT22 y la pantalla LCD.

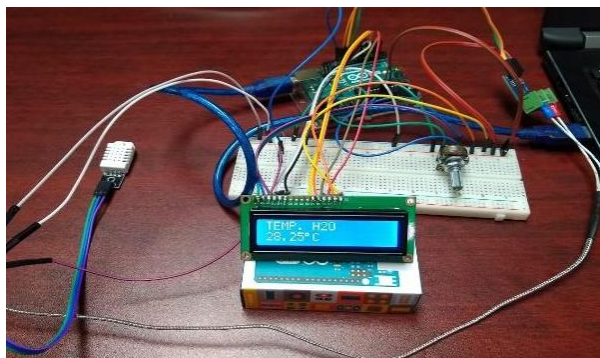


Figura 4. Circuito electrónico realizado para medir y visualizar variables del cultivo.
Fuente: Elaboración propia

3.4 Modelado del sistema en software de Diseño Asistido por Computadora (CAD).

La representación tridimensional preliminar del sistema se modeló utilizando la herramienta Vectary (Figura 5). El diseño contempló la distribución de los componentes y el acoplamiento de los elementos principales: estructura de soporte, sistema fotovoltaico, tanque de almacenamiento de nutrientes y el gabinete de control.

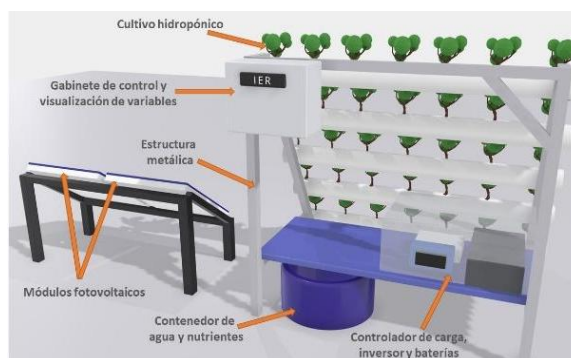


Figura 5. Modelado en 3D del sistema en la herramienta Vectary.
Fuente: Elaboración propia

Se realizaron adecuaciones estructurales y técnicas en el prototipo, desarrollando posteriormente el modelado definitivo en el software SolidWorks® para obtener los planos constructivos y las dimensiones finales. En la Figura 6 se visualiza el sistema hidropónico mediante las vistas de ingeniería generadas en el entorno digital.

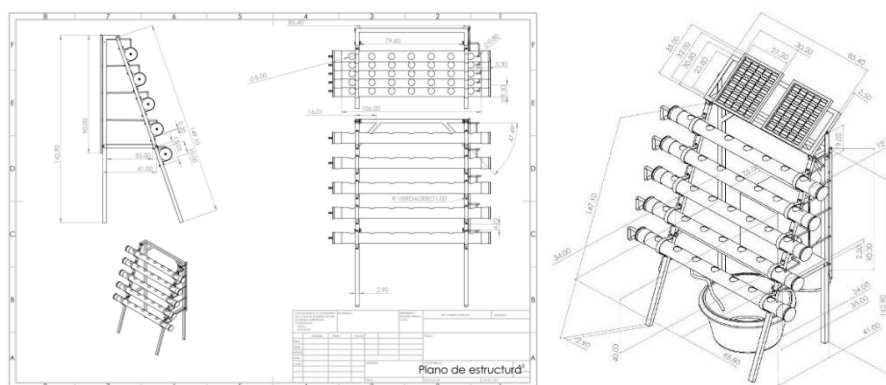


Figura 6. Estructura final del prototipo hidropónico solar. Dimensiones en centímetros
Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de validar de una forma mas estética el prototipo, se aplicaron texturas superficiales a cada pieza del ensamble, y se ejecutó un renderizado del modelo. La Figura 7 muestra la arquitectura tridimensional del sistema hidropónico vertical, donde se visualizan los cinco niveles de cultivo, estructura, líneas de conducción de agua, módulos fotovoltaicos, gabinete para resguardo de los componentes del SFVA y los dispositivos de control.

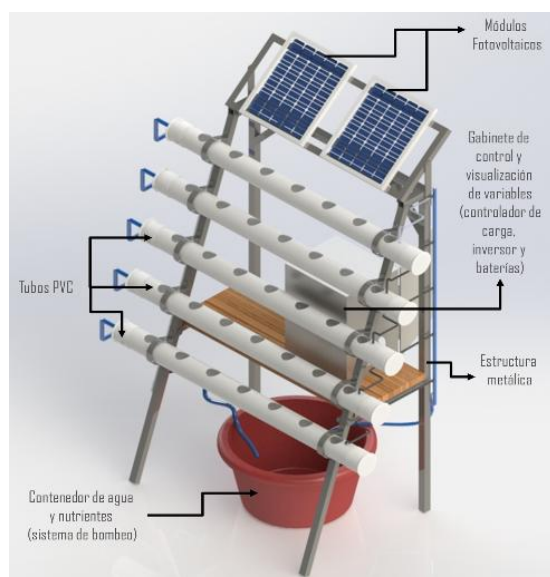


Figura 7. Modelado final en SolidWorks
Fuente: Elaboración propia

3.5 Construcción y puesta en marcha

Se llevó a cabo la construcción del sistema integrando e interconectando los componentes (ver Figura 8). La figura muestra el resultado final de la estructura del prototipo, donde se observa el sistema de riego NFT y los 35 espacios para cultivar. Además, la incorporación de los módulos fotovoltaicos en la parte superior de la estructura metálica.



Figura 8. Construcción del prototipo hidropónico
Fuente: Elaboración propia

4. Discusión

Los hallazgos del presente estudio confirman lo siguiente. En primer lugar, la autosuficiencia energética se valida al comprobar que el arreglo fotovoltaico aislado dimensionado para una demanda diaria de 68.42 Wh/día es capaz de sostener el prototipo sin recurrir a la red eléctrica convencional. Esta estrategia operativa de bombeo intermitente resulta consistente con la reportada por Mujiyanti et al., quienes registraron consumos de 200 Wh/día con autonomías de 48 horas en sistemas hidropónicos verticales alimentados por bancos de baterías de 50 Ah (Mujiyanti et al., 2025).

En segundo lugar, se comprueba la eficiencia de la integración modular en la estructura diseñada con cinco tubos de PVC de tres pulgadas que permiten cultivar simultáneamente 35 hortalizas, la inclinación de los módulos fotovoltaicos se ajustó a la latitud local permitiendo captar el mayor potencial solar, el modelado paramétrico en SolidWorks permite visualizar y modificar el sistema hasta considerar una expansión simultánea de canales de cultivo y de paneles solares. Esta modularidad contrasta favorablemente con diseños monolíticos reportados por Sportelli et al., quienes identificaron que de 74 prototipos IoT analizados, la mayoría no ofrecen certificaciones de interoperabilidad que aseguren continuidad operativa completa (Sportelli et al., 2025).

La comparación con la literatura revela también aspectos relevantes. Pichoasamin et al. (2022), reportaron un sistema NFT implementado con ESP32 monitoreado por Arduino Cloud durante tres meses, validando pH y temperatura como variables críticas; el prototipo desarrollado en esta investigación coincide en la selección de Arduino como unidad de control y la opción de añadir un termopar tipo K, incrementa la resolución térmica útil para ensayos en regiones semiáridas. La discusión energética debe enmarcarse, en la directriz de Kabakchieva et al. (2025), quienes recomiendan sobredimensionar la potencia fotovoltaica al menos un 80 % respecto a la carga nominal. Por ello, aunque las dimensiones actuales del arreglo de dos módulos fotovoltaicos de 10 W satisfacen los requerimientos nominales, sería recomendable incrementar el sobredimensionamiento para alcanzar la autonomía de cuatro días.

Entre las implicaciones del trabajo destacan: en primer lugar, la viabilidad técnica de cultivar 35 plantas hidropónicas simultáneamente en espacios urbanos reducidos con energía 100 % renovable. Segundo, la reducción potencial de la huella de carbono al

desacoplar la operación del cultivo de la red eléctrica convencional, alineado con la observación de Rana et al. (2025), quienes reportan autonomías energéticas de hasta 92 % en microrredes aisladas. Tercero, la reducción hídrica esperable, comparada con la reportada por sistemas análogos que alcanzan ahorros de hasta el 90 % en el consumo de agua (Palomino-Resendiz et al., 2025).

Con respecto a la escalabilidad de la tecnología propuesta, la transición desde este prototipo de traspatio (35 plantas) hacia modelos de producción hidropónica más extensos genera efectos predecibles sobre las dinámicas de medición y consumo. En una infraestructura a mayor escala, la longitud extendida de los canales NFT incrementaría de forma no lineal la evaporación y la pérdida de carga hidráulica, exigiendo un rediseño de la potencia de bombeo y un sobredimensionamiento del arreglo de módulos fotovoltaicos y la capacidad del banco de baterías (Ah). En la cuestión del monitoreo, sistemas extensos experimentarían gradientes térmicos significativos a lo largo del flujo de la solución nutritiva; esto requeriría sustituir el sistema de control (Arduino UNO) por una red de sensores distribuidos bajo arquitecturas con mayor capacidad de procesamiento y comunicación inalámbrica (ESP32 o IoT) para segmentar el monitoreo de temperatura, pH y conductividad eléctrica por zonas, garantizando la homogeneidad física y química indispensable para mantener la viabilidad biológica del cultivo a gran escala.

Sin embargo, una limitación del prototipo es que fue validado únicamente en una zona geográfica (Huichapan, Hidalgo, México), sin pruebas prolongadas de nubosidad variable; la cosecha real por ciclo y la tasa de germinación no han sido reportadas todavía. Como trabajo futuro, se proyecta extender el periodo de validación a múltiples ciclos de cultivo hidropónico, realizar pruebas con algún otro tipo de hortaliza e integrar conectividad y aplicación de Internet de las cosas (IoT) para el monitoreo remoto del prototipo. Se considera también implementar un sistema automático de dosificación de solución nutritiva basado en lecturas de conductividad eléctrica y pH, del tipo validado por Jain y Kaur en granjas NFT (Jain & Kaur, 2024). Estas extensiones consolidarán al sistema como una plataforma de agricultura de precisión verdaderamente transferible al traspatio mexicano.

Conclusiones

La presente investigación demostró la viabilidad técnica y operativa de un sistema de cultivo hidropónico automatizado y energéticamente sustentable, diseñado como una alternativa tecnológica frente a los desafíos de la seguridad alimentaria en entornos urbanos y la mitigación de emisiones contaminantes. La integración de tecnologías agrícolas y de ingeniería permitió la consolidación de un prototipo funcional cuya principal ventaja radica en su modularidad y escalabilidad; lo que hace posible la ampliación sistemática de la infraestructura orientada al cultivo de hortalizas como el redimensionamiento proporcional de sus componentes periféricos de control y almacenamiento energético.

Desde la perspectiva de la ingeniería de diseño, el empleo de la herramienta de modelado CAD tridimensional Vectary resultó fundamental como etapa de validación espacial preliminar. Esta herramienta permitió optimizar la distribución geométrica y el acoplamiento de los cuatro subsistemas base (infraestructura de soporte, contenedor de solución nutritiva, arreglo fotovoltaico y gabinete de control). El modelar en el software de diseño SolidWorks permitió mejorar el sistema, reduciendo los errores de ensamblaje en la fase de manufactura física. Asimismo, el rigor metodológico aplicado en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico aislado (SFVA), sustentado en un recurso solar disponible de 5.2 HSP y en la integración de la demanda del sistema de bombeo (24W) y los dispositivos de adquisición de datos, lo que garantizó la autonomía eléctrica

total del prototipo, eliminando la dependencia de la red eléctrica convencional y mitigando de manera directa la huella de carbono asociada.

Finalmente, el sistema de instrumentación implementado probó ser confiable para la medición y la visualización en tiempo real de las variables críticas que inciden en el desarrollo vegetal, regulando eficazmente los ciclos de irrigación automatizados mediante un régimen operativo de 10 minutos por hora durante un fotoperiodo de 12 horas diarias. En resumen, este trabajo aporta un modelo tecnológico interdisciplinario, eficiente y reproducible, alineado con las tendencias globales de agricultura urbana sustentable y microrredes aisladas basadas en energías renovables.

Contribución: Conceptualización: I.J.L y M.E.P.R; metodología y validación: J.A.A.J y D.J.I

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos: No aplica.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Alotaibi, H., Karsou, W., Khan, S., Tohmeh, S. B., & Bashar, A. (2023). *Bustani: A Microcontroller-based Automated Hydroponic Vertical Farming Solution*. 56–61. <https://doi.org/10.1109/agreta57740.2023.10262605>
- Bulnes, M. E. P., Mitma, J. L. I., Espinoza, V. A. A., Puelles, A. L. A., Lévano, M. Á. G., Espinoza, Y. L. C., & Puelles, Y. A. A. (2025). *Smart Urban Farming with Sustainable Mini-Garden as a Technological Solution to Food Insecurity*. <https://doi.org/10.18687/laccei2025.1.1.2454>
- Ching, S., Tay, F. S., Chai, A. B. Z., & Ching, C. P. (2025). Design and develop an IoT automated nutrient control in a hydroponic system. *Future Sustainability*, 3(3), 18–25. <https://doi.org/10.55670/fpll.fusus.3.3.3>
- García-Salazar, J. A., Bautista-Mayorga, F., & Santiago, E. R. (2023). Factores que condicionan la tasa de adopción de sistemas de riego tecnificados en México. *Agronomía Mesoamericana*, 51202–51202. <https://doi.org/10.15517/am.v34i2.51202>
- Gutiérrez, A. Y. P. (2023). Redes de colaboración solidaria: dos casos de estudio en el estado de Hidalgo, México. *Cooperativismo & Desarrollo*, 31(126), 1–25. <https://doi.org/10.16925/2382-4220.2023.02.07>
- Hernández, F. de J. X., Moreno, V. J. A. A., García, E. C. A. O., & López, J. J. C. A. M. (2017). *Estudio de mercado para el sistema NFT hidropónico en la ciudad de Saltillo, Coahuila*. <http://www.repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/42742>
- Jain, S., & Kaur, M. (2024). Design and Implementation of an IoT-based automated EC and pH Control System in an NFT-based Hydroponic Farm. *Engineering Technology & Applied Science Research*, 14(1), 13078–13081. <https://doi.org/10.48084/etasr.6393>
- Kabakchieva, R., Kabakchiev, A., & Gabrovska-Evstatieva, K. (2025). Sizing and Analysis of an Off-Grid Photovoltaic Power Supply for an Irrigation System. 1–5. <https://doi.org/10.1109/eeae65901.2025.11273676>
- Khare, C. P. (2004). *Indian herbal remedies: Rational Western therapy, ayurvedic and other traditional usage, botany*. Springer, 375–376.
- Kovácsné Madar, A., Rubóczki, T., y Takácsné Hájos, M. (2019). Lettuce production in aquaponic and hydroponic systems. *Acta Universitatis Sapientiae: Agriculture and Environment*, 11, 51–59. <https://doi.org/10.2478/ausae-2019-0005>
- Kumara, V., Mohanaprakash, T. A., Fairrooz, S., Jamal, K., Babu, T. S., & Boopathi, S. (2023). Experimental Study on a Reliable Smart Hydroponics System. In *Advances in environmental engineering and green technologies book series* (pp. 27–45). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-4118-3.ch002>
- Laitón, J. H. M., & Torres, M. T. (2025). Producción Hidropónica De Lechuga (*Lactuca sativa*) Aprovechando La Captación De Aguas Lluvias. *Agricolae & Habitat*, 8(2), 9–29. <https://doi.org/10.22490/26653176.8303>
- Lavariega, E. V., & Erika;#0009-0004-6547-6306, V. L. (2025). Análisis y diseño de un sistema de agricultura sustentable bajo cubierta, caso de estudio en Tonalapa, Tetela De Ocampo, Puebla, México. <https://doi.org/10.24275/uama.5808.13034>
- Lazo, R. P., & Gonzabay, J. Q. (2020). Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido. *La Granja*, 31(1), 118–130. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.09>
- López, G., Jirón, J. M. P., Rodríguez, K., Velardes, S., & Rosales, H. (2019). Validación de un diseño fotovoltaico con un consumo de 30 Watts DC, para ser utilizado con un sistema NFT en comunidades sin acceso a la red eléctrica. *Revista de Iniciación Científica*, 5, 70–73. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.0.2388>
- Moreno, A. S., & Sosa-Perdomo, A. (2025). Huertos familiares y escasez hídrica en la producción de alimentos. *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*. <https://doi.org/10.24836/es.v35i66.1633>
- Mujiyanti, S. F., Aisyah, P. Y., Susanto, B. F., Nanta, T. L., Kirana, I. A. R., & Kurniawan, I. A. (2025). *Optimum Battery Sizing and PV Integration for Off-Grid Vertical Hydroponic Systems*. 85–90. <https://doi.org/10.1109/ict-pep67281.2025.11231816>
- National Aeronautics and Space Administration. (2026). *POWER Data Access Viewer*. NASA Langley Research Center. Recuperado el 25 de febrero de 2026, de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Ng, A. K., Chin, J. Z., & Maheswaran, R. (2023). *Energy Conservation Strategies for Increased Sustainability and Energy Efficiency in Urban Farming*. 1–6. <https://doi.org/10.1109/soli60636.2023.10425538>
- Noumedem, J. A. K., Djeussi, D. E., Hritcu, L., Mihasan, M. y Kuete, V. (2017). *Lactuca sativa*. En *Medicinal spices and vegetables from Africa: Therapeutic potential against metabolic, inflammatory, infectious, and systemic diseases* (pp. 437–449). Academic Press.
- Oberlé, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., Clement, J., Cabernard, L., Che, N., Chen, D., Droz-Georget, H., Ekins, P., Fischer-Kowalski, M., Flörke, M., Frank, S., Froemelt, A., Geschke, A., Haupt, M., Havlík, P., Hüfner, R., ... Zhu, B. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. IIASA PURE (International Institute of Applied Systems Analysis).
- Olmos, C. J., Castro, M. L., Landa, J. R., & Hernández, A. C. B. (2024). *Desarrollo de un sistema hidropónico como fuente de alimentación para complementar la canasta básica*. <https://doi.org/10.25009/is.v0i17.2832>
- Osman, A. I., Redpath, D., Lichtfouse, É., & Rooney, D. W. (2023). Synergy between vertical farming and the hydrogen economy. *Environmental Chemistry Letters*, 22(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01648-5>

24. P., R. S. R., R., J. R., S., R. S. V. N., M., C., F., S. F. N., & Ebil, M. (2023). Less water treatment: Fusion of drip irrigation and hydroponics method in agriculture. *African Journal of Agricultural Research*, 19(10), 1006–1009. <https://doi.org/10.5897/ajar2023.16367>
25. Palomino-Resendiz, Gutiérrez-Hernández, I. S., Ramirez, D. A. T., Ontiveros, M. A. B., & Tellez, A. C. (2025). *Cultivos Hidropónicos con Sistemas Embebidos e Iluminación Solar Para Casas Sostenibles en Zonas Aisladas*.
26. Panzo, C. G., Cruz, M. C. de la, Cruz, R., & Huerta, L. H. (2025). Producción Hidropónica de Hortalizas bajo el Sistema NFT y Huerto Tradicional. *Revista Científica de Salud y Desarrollo Humano*, 6(1), 494–511. <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v6i1.492>
27. Pérez, N. V. R., Medina, J. A. P., Manríquez, M. C., Rodríguez, J. A. A., Gutiérrez, A. I. B., & Prado-Olivarez, J. (2025). Agricultura urbana en México: evaluación sobre su factibilidad y viabilidad técnica, política, económica y eficiencia energética. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 22(4). <https://doi.org/10.22231/asyd.v22i4.1741>
28. Pichoasamin, D., Astudillo, P., Vera, M. G., Paredes, P., & Calispa, M. P. (2022). *Monitoreo y control remoto de un sistema hidropónico tipo NFT mediante IoT*.
29. Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. Gr., & Vasiliadis, L. (2023). A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use. *Energies*, 16(4), 1690–1690. <https://doi.org/10.3390/en16041690>
30. Porras, J. P., Tinajero, J. L. L., Paucar, J. L. S., & Lozada, P. E. Y. (2022). *Implementación de un sistema de monitoreo y control automatizado de un cultivo hidropónico NFT (Nutrient Film Technique)*.
31. Rana, A., Kaushal, S., & Kanwar, A. (2025). Renewable-powered Off-Grid Hydroponic Systems for Resource-Efficient Agriculture: A Comprehensive Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 15(12), 34–51. <https://doi.org/10.9734/ijec/2025/v15i125145>
32. Riva, J. A. S. de la. (2025). Estudio de caso, análisis de la rentabilidad de un invernadero hidropónico de producción de tomate roma en el estado de Guanajuato, México. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 6(6). <https://doi.org/10.56712/latam.v6i6.4809>
33. Schiaffini-Aponte, R., Soto-Ramírez, M., Valera-Pérez, M. Á., & Linares-Fleites, G. (2023). Del estrés a la escasez hídrica: su impacto en la paz y el desarrollo global. *Dehuidela/Revista Latinoamericana de Derechos Humanos/Revista Latinoamericana de Derechos Humanos (San José)*, 35(1), 1–26. <https://doi.org/10.15359/rldh.35-1.7>
34. Sportelli, M., Rosa, D. L., Crivello, A., Pineda-Medina, D., Bacco, M., & Barsocchi, P. (2025). Beyond Prototypes: What Is Missing to Fill the Gaps in IoT-Enabled Hydroponics Platforms. *Horticulturae*, 11(11), 1322–1322. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11111322>
35. Tatas, K., Al-Zoubi, A., Christofides, N., Zannettis, C., Chrysostomou, M., Panteli, S., & Antoniou, A. (2022). Reliable IoT-Based Monitoring and Control of Hydroponic Systems. *Technologies*, 10(1), 26–26. <https://doi.org/10.3390/technologies10010026>
36. Velazquez Lavariega, E. (2025). Análisis y diseño de un sistema de agricultura sustentable bajo cubierta, caso de estudio en Tonalapa, Tetela De Ocampo, Puebla, México. Obtenido de: <https://doi.org/10.24275/uama.5808.13034>.
37. Vega, I., Bien-Amié, D., Augustin, G., Heiden, W., & Heiden, N. (2023). Intermittent circulation of simplified deep flow technique hydroponic system increases yield efficiency and allows application of systems without electricity in Haiti. *Agriculture & Food Security*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00422-8>
38. Villavicencio-Valdez, G. V., Jacobi, J., Schneider, M., Altieri, M. A., & Suzán-Azpiri, H. (2023). Urban agroecology enhances agrobiodiversity and resilient, biocultural food systems. The case of the semi-dryland and medium-sized Querétaro City, Mexico. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1066428>
39. Waluyo, W., Widura, A., Hadiatna, F., & Anugerah, D. (2023). Fuzzy-Based Smart Farming and Consumed Energy Comparison Using the Internet of Things. *IEEE Access*, 11, 69241–69251. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3291616>
40. Wegren, S. K., & Тропчук, И. (2020). Is Industrial Agriculture Sustainable During Climate Change and Ecological Threats? *Journal of Economic Sociology*, 21(5), 12–38. <https://doi.org/10.17323/1726-3247-2020-5-12-38>
41. Yap, Q. C. y Teo, S. S. (2019). Lettuce (*Lactuca sativa*) growth performance in saltwater, soil, and aquaponic systems. *Agriculture and Food Sciences Research*, 6, 203–210. <https://doi.org/10.20448/journal.512.2019.62.203.210>