



REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 3, Número 2
Abril-Junio 2026

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, www.omniscens.com

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 2
abril-junio 2026

Publicación trimestral
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: admin@omniscens.com

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.



Copyright © 2026: Los autores



9773061781003

Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 3, Núm. 2, abril-junio 2026, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, admin@omniscens.com, Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 abril 2026.



Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 2, 2026, abril-junio

DOI: <https://doi.org/10.71112/adkpvf84>

**DISEÑO BASADO EN SIMULACIÓN DE UNA MICRORRED SOLAR DE RIEGO
AGRÍCOLA RESILIENTE CON CONTROL ANALÓGICO-DISCRETO PARA LA
AGRICULTURA RURAL DEL CARIBE**

**SIMULATION-BASED DESIGN OF A RESILIENT SOLAR-POWERED
AGRICULTURAL IRRIGATION MICROGRID WITH ANALOG-DISCRETE CONTROL
FOR RURAL CARIBBEAN AGRICULTURE**

Baldo Alberto Luigi Dalporto

República Dominicana

Diseño basado en simulación de una microrred solar de riego agrícola resiliente con control analógico-discreto para la agricultura rural del Caribe
Simulation-based design of a resilient solar-powered agricultural irrigation microgrid with analog-discrete control for rural Caribbean agricultura

Baldo Alberto Luigi Dalporto^{a,*}

baldo.dalporto@intec.edu.do

<https://orcid.org/0009-0008-8719-1562>

*Autor de correspondencia: baldo.dalporto@intec.edu.do, ^aInstituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), República Dominicana

RESUMEN

La vulnerabilidad climática, el estrés hídrico, la inseguridad energética y las limitaciones de productividad agrícola convergen con especial intensidad en contextos caribeños de pequeñas islas y en desarrollo tropical. Este artículo presenta RESILIA-AGRO-DR, una plataforma modular de riego solar agrivoltaico diseñada para la República Dominicana y adaptable a América Latina. El sistema propuesto integra una bahía fotovoltaica agrivoltaica de 5,5 kWp, un banco de baterías de 48 V, riego por goteo, seguimiento analógico de puntos de máxima potencia, lógica de riego basada en hardware, circuitos de protección discretos y un supervisor de inteligencia artificial opcional para optimización no crítica. El principio central de diseño es la separación funcional: acciones críticas para la seguridad como la protección de baterías, la prevención de funcionamiento en seco, el umbral entre humedad del suelo y el enclavamiento de bombas se ejecutan mediante lógica analógica y discreta verificable en lugar de por software. La inteligencia artificial se utiliza únicamente para recomendaciones de puntos de

ajuste informadas por el clima, mantenimiento predictivo y análisis operativos. Se generó un conjunto de datos sintético de simulación de 45 días para evaluar la autonomía energética, la demanda de riego, el estado de carga de las baterías y la reducción del consumo de agua bajo supuestos representativos de operación tropical. El módulo simulado de 5,5 kWp producía $19,9 \pm 3,8$ kWh día⁻¹, mientras que las cargas diarias totales promediaban $5,47 \pm 0,74$ kWh día⁻¹. El estado medio de carga de la batería al final del día se mantuvo por encima del 90% tras el periodo inicial de recuperación de carga, y el sistema mantuvo el cumplimiento del 100% de autonomía energética usando un criterio del 20% de estado mínimo de carga. El riego agrícola simulado basado en la demanda redujo el agua aplicada en un 22,5% en comparación con un programa convencional de goteo. Un modelo económico de base estimó un retorno simple de aproximadamente 5,5 años bajo supuestos beneficios evitados en el diésel, mano de obra, agua y productividad. Los resultados respaldan a RESILIA-AGRO-DR como una plataforma técnicamente plausible y socialmente relevante para la electrificación rural resiliente, la agricultura eficiente en el consumo de agua y la infraestructura de energía renovable sostenible localmente. El despliegue en el campo es necesario para validar la respuesta agronómica, la fiabilidad a largo plazo, la resistencia a la corrosión tropical y el rendimiento tecnoeconómico completo.

Palabras clave: Agrivoltaica; Energía renovable; Electrónica discreta; Riego solar; República Dominicana; Resiliencia climática; Microrredes rurales; Inteligencia artificial; Nexo agua-energía-alimento; Control de hardware a prueba de fallos.

ABSTRACT

Background: The Dominican Republic and many Latin American and Caribbean countries face increasing challenges related to energy resilience, climate vulnerability, rural electrification, agricultural productivity, and continuity of essential services during grid failures or extreme

weather events. Conventional renewable microgrid solutions are generally based on digital controllers, proprietary software, commercial inverters, and cloud-based monitoring platforms, which may limit local repairability, technological sovereignty, and fail-operational behavior in vulnerable contexts.

Objective: This study proposes RESILIA-AGRO-DR, an innovative agrivoltaic renewable-energy platform based on photovoltaic generation, analog maximum power point tracking, hybrid battery–supercapacitor storage, hardware-based load prioritization, water–energy integration, and optional artificial intelligence for non-critical optimization.

Methods: The proposed system was developed as a doctoral-level engineering design integrating five major subsystems: an elevated agrivoltaic photovoltaic array, an analog MPPT power-conditioning stage, a 48 V DC resilient nanogrid, hybrid energy storage, and a discrete-electronics load-management architecture. The critical control layer is implemented using analog and discrete components, including operational amplifiers, comparators, analog switches, voltage references, PWM controllers, MOSFET drivers, relays, and protection devices. Artificial intelligence is considered only as an optional supervisory layer for forecasting, maintenance prediction, and operational reporting, without replacing hardware-based safety functions.

Expected results: The proposed architecture is expected to improve continuity of critical loads such as emergency lighting, communication systems, water pumping, medical refrigeration, and basic community services. The hybrid storage configuration is expected to reduce battery stress during transient events, while the agrivoltaic structure may provide simultaneous energy generation, agricultural shading, water-management support, and climate-adaptation benefits.

Conclusions: RESILIA-AGRO-DR represents a technically feasible and socially relevant renewable-energy architecture for the Dominican Republic and LATAM. Its originality lies in the integration of agrivoltaics, analog MPPT, hardware-prioritized loads, hybrid storage, and

optional AI into a fail-operational system designed for resilience, local maintainability, and potential governmental deployment. The project provides a credible basis for prototype development, doctoral research, intellectual-property exploration, and Scopus-oriented publication.

Keywords: Renewable energy; Agrivoltaics; Analog MPPT; Discrete electronics; Microgrid; Dominican Republic; Energy resilience; Hybrid storage; Artificial intelligence; Photovoltaic systems.

Recibido: 3 mayo 2026 | Aceptado: 19 mayo 2026 | Publicado: 20 mayo 2026

Aspectos destacados

- Se propone una plataforma modular de riego agrícola para las necesidades de resiliencia climática de Dominica y el Caribe.
- El núcleo de control crítico para la seguridad utiliza comparadores analógicos, pestillos, temporizadores, enclavamientos y circuitos de protección en lugar de firmware.
- La inteligencia artificial está restringida a la optimización supervisora, preservando la operación autónoma del hardware durante fallos de software o conectividad.
- Una simulación sintética de 45 días indica autonomía energética, resiliencia de las baterías y una menor demanda de agua de riego del 22,5% bajo las suposiciones establecidas.
- El diseño se posiciona como un prototipo de investigación, propuesta de financiación gubernamental y una posible plataforma de propiedad intelectual.

Nomenclatura

Tabla 1

Abreviaturas y símbolos usados en el manuscrito.

Símbolo	Significado
---------	-------------

AV	Sistema agrivoltaico
BESS	Sistema de almacenamiento de energía por baterías
ET _c	Evapotranspiración de cultivos
GCR	Relación de cobertura del terreno de la estructura fotovoltaica
GHI	Irradiación horizontal global
LER	Relación equivalente a tierras
MPPT	Seguimiento de puntos de máxima potencia
PR	Relación de rendimiento fotovoltaico
SOC	Estado de carga de la batería
WUE	Eficiencia en el uso del agua

INTRODUCCIÓN

La literatura sobre sistemas fotovoltaicos, microredes y agrivoltaica muestra que la integración entre generación renovable, almacenamiento, control energético y uso dual del suelo constituye una línea estratégica para aumentar la resiliencia energética en regiones vulnerables. Desde el punto de vista fotovoltaico, el modelado eléctrico de módulos solares requiere considerar la curva no lineal corriente–tensión, la variación por irradiancia y temperatura, y la localización dinámica del punto de máxima potencia, aspectos ampliamente tratados en modelos de arreglo fotovoltaico y estudios de algoritmos MPPT (Villalva et al., 2009; Hohm & Ropp, 2003; Femia et al., 2005; Jain & Agarwal, 2004; Reisi et al., 2013). En el ámbito de las microredes, la operación local con fuentes distribuidas, almacenamiento y cargas priorizadas ha sido reconocida como una arquitectura clave para mejorar confiabilidad,

autonomía y continuidad de servicios esenciales (Lasseter et al., 2002; Parhizi et al., 2015). De forma complementaria, los sistemas agrivoltaicos han demostrado que la coexistencia de paneles fotovoltaicos y producción agrícola puede mejorar el uso del suelo, modificar favorablemente el microclima y aumentar la productividad combinada de electricidad y biomasa bajo configuraciones adecuadas (Marrou et al., 2013; Valle et al., 2017). En este contexto, la presente propuesta se fundamenta también en criterios clásicos de diseño electrónico analógico para acondicionamiento, comparación, filtrado y control de señales, de acuerdo con principios ampliamente establecidos en circuitos analógicos (Allen & Holberg, año). La transición energética en la República Dominicana no debe entenderse únicamente como la sustitución de la generación fósil por generación renovable. En un contexto insular caribeño expuesto a huracanes, sequías, inundaciones, estrés térmico, inestabilidad en la red y vulnerabilidad agrícola, la infraestructura de energías renovables se convierte en un instrumento de resiliencia. El Banco Mundial ha enfatizado que se espera que el cambio climático afecte a la productividad laboral dominicana, la salud, los rendimientos agrícolas, el turismo, las infraestructuras y los ecosistemas naturales para mediados de siglo (Banco Mundial, 2023).

Paralelamente, la política de energías renovables está impulsando al país hacia una mayor penetración de renovables, integración del almacenamiento y soluciones de energía distribuida (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2025; Departamento de Comercio de EE. UU., Administración de Comercio Internacional, 2026). Estas dinámicas hacen que la electrificación agrícola y la seguridad hídrica sean sectores estratégicos para la investigación en ingeniería aplicada.

La agricultura es especialmente sensible a los efectos combinados de la variabilidad de las lluvias, el estrés térmico y la disponibilidad de energía. El riego a diésel es operativamente costoso, logísticamente frágil y medioambientalmente indeseable. El riego conectado a la red

también es vulnerable cuando la fiabilidad de los alimentadores es limitada o el clima extremo afecta a las redes de distribución. El bombeo solar reduce la dependencia del combustible, pero los sistemas convencionales de bombeo solar suelen diseñarse como paquetes electromecánicos aislados en lugar de plataformas integradas de agua, energía y resiliencia alimentaria.

La agrivoltaica ofrece una respuesta prometedora porque permite la generación de electricidad colocalizada y la producción de cultivos. El trabajo fundamental de Goetzberger y Zastrow (1982) propuso la coexistencia de la conversión de energía solar y el cultivo de plantas, mientras que investigaciones posteriores demostraron que las estructuras agrivoltaicas pueden mejorar la eficiencia del uso del suelo y, bajo condiciones climáticas y agronómicas adecuadas, reducir el estrés hídrico de los cultivos y el estrés térmico fotovoltaico (Dupraz et al., 2011; Dinesh & Pearce, 2016; Barron-Gafford et al., 2019; Weselek et al., 2019). Estos hallazgos son especialmente relevantes para regiones tropicales calientes y con reservas de agua.

Sin embargo, el auge de la agricultura inteligente y el riego basado en el Internet de las Cosas ha introducido otra dependencia: el software. Una filosofía de diseño orientada a la resiliencia basada en el control transparente del hardware ha sido defendida en contextos críticos de instrumentación para la seguridad y se adapta aquí a la agricultura de energías renovables (Dalporto et al., 2026). En entornos con muchos recursos, la optimización basada en software suele ser aceptable. En contextos rurales tropicales, las pérdidas de conectividad, defectos de firmware, vulnerabilidades ciberfísicas, escasez de componentes, transitorios por rayos y limitaciones de mantenimiento pueden convertir la dependencia del software en un riesgo operativo. Por esta razón, RESILIA-AGRO-DR adopta una filosofía de diseño híbrida. Sus funciones críticas se ejecutan mediante electrónica analógica-discreta transparente y

localmente diagnosticable, mientras que la inteligencia artificial sigue siendo opcional y supervisada.

Este artículo presenta la versión final de investigación manuscrita de RESILIA-AGRO-DR. El manuscrito incluye una sección formal de materiales y métodos, dimensionamiento energético, diseño electrónico de bloques, diagramas funcionales, un protocolo de validación, un conjunto de datos sintético de campo/simulación, análisis económico, comparación con sistemas comerciales representativos de riego solar y una discusión sobre novedad científica. La versión actual solo informa de resultados simulados; Por lo tanto, es adecuado como manuscrito de diseño y simulación o como base para un artículo experimental posterior tras su despliegue en campo.

Brecha en la investigación

La literatura y el panorama comercial revelan cuatro lagunas que motivan la arquitectura propuesta. En primer lugar, los productos de riego solar suelen enfatizar el rendimiento del bombeo, la monitorización remota o los paquetes de financiación (Grundfos, 2026; LORENTZ, 2026; SunCulture, 2026), pero no integran necesariamente la protección de cultivos agrícolas, la reparabilidad del hardware local y una lógica autónoma de riego infalible. En segundo lugar, muchos sistemas de riego inteligente dependen de microcontroladores, conectividad inalámbrica o plataformas en la nube, lo que puede crear un único punto de fallo en entornos rurales de baja conectividad. En tercer lugar, la investigación agrícola se centra a menudo en la productividad equivalente a la tierra, fisiología de cultivos o rendimiento fotovoltaico, pero menos frecuentemente en arquitecturas de control electrónico discreto adaptadas a la operación rural tropical. Cuarto, pocos sistemas separan explícitamente el control de hardware crítico para la seguridad de la optimización no crítica basada en IA.

Contribuciones

Una arquitectura modular de riego solar agrivoltaico para contextos rurales dominicanos y latinoamericanos.

Un diseño de control electrónico discreto que utiliza acondicionamiento de sensores, comparadores, umbrales Schmitt, pestillos, circuitos de temporización y enclavamientos de alimentación.

Una capa opcional de supervisión de IA que no puede anular restricciones de seguridad del hardware.

Un modelo sintético reproducible de simulación para balance energético, demanda de riego, SOC de baterías y ahorro de agua.

Un análisis tecnoeconómico y de posicionamiento comercial frente a sistemas de mercado representativos.

METODOLOGÍA

Materiales y métodos

El diseño electrónico propuesto se basa en una arquitectura modular de adquisición, acondicionamiento y control analógico. La tensión y la corriente del arreglo fotovoltaico se escalan mediante divisores resistivos, sensores de corriente y etapas de acondicionamiento con amplificadores operacionales. La potencia instantánea se estima mediante una operación analógica proporcional a $P_{PV} = V_{PV}I_{PV}$, y la señal resultante se emplea para implementar un esquema MPPT tipo perturbación-observación. Este enfoque se justifica por la amplia utilización del MPPT en sistemas fotovoltaicos y por la evidencia previa sobre el desempeño comparativo de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia, incluyendo métodos de perturbación-observación, conductancia incremental y estrategias de paso variable (Hohm & Ropp, 2003; Femia et al., 2005; Jain & Agarwal, 2004; Reisi et al., 2013). El modelo eléctrico de referencia del arreglo fotovoltaico se apoya en formulaciones de un diodo y parámetros

derivados de datos de hoja técnica, siguiendo aproximaciones ampliamente usadas para simulación y análisis de arreglos FV (Villalva et al., 2009).

Diseño del estudio y estado del manuscrito

Este estudio está estructurado como un artículo de diseño y simulación de ingeniería aplicada. El sistema propuesto aún no ha sido validado en un ensayo físico de campo en esta versión manuscrita. Por lo tanto, todos los valores numéricos de rendimiento reportados en la sección de Resultados son explícitamente sintéticos y deben interpretarse como evidencia de selección de diseño en lugar de mediciones empíricas de campo. El objetivo de la simulación no era demostrar el rendimiento en campo, sino comprobar si el tamaño propuesto, la filosofía de control y la lógica de funcionamiento son internamente consistentes bajo condiciones tropicales representativas.

Escala del sistema y supuestos piloto

El módulo de referencia representa una bahía de riego agrícola orientada a pequeños agricultores capaz de soportar aproximadamente 0,1 ha de superficie agrícola de riego por goteo y cargas agrícolas auxiliares. El piloto está concebido para contextos agrícolas de tierras bajas o periurbanas dominicanas, donde los recursos solares diarios son favorables pero la variabilidad de las lluvias, el estrés térmico y la falta de fiabilidad en la red motivan la operación autónoma. La clase de cultivo asumida es un cultivo hortícola como tomate, pimiento o verduras de hoja, seleccionado porque estos cultivos son sensibles al estrés hídrico y pueden beneficiarse de un sombreado parcial cuando el estrés térmico es alto. Los coeficientes específicos del cultivo, la distribución de lluvias, las propiedades del viento y del suelo deben ser reemplazados por valores medidos durante la fase de campo.

Tabla 2*Suposiciones base utilizadas para la simulación sintética y la acotación.*

Parámetro	Valor asumido	Justificación
Matriz fotovoltaica	10 módulos × 550 Wp	Capacidad nominal de corriente continua de 5,5 kWp
Batería	48 V, 200 Ah LiFePO4	Capacidad nominal de 9,6 kWh
Bomba	Bombas alimentadas por 48 V DC o DC	1,1 kW nominal; Flujo objetivo de 2,5-3,0 m ³ h ⁻¹
Área de mando de riego	0,1 ha	Área piloto hortícola de 1.000 m ²
Cabeza hidráulica	Cabeza dinámica total de 22 m	Incluye elevación, fricción, presión del filtro y del emisor
Relación de rendimiento fotovoltaica	0.76	Incluye pérdidas térmicas, de cableado, de conversión y de suciedad
Criterio de reserva de batería	SOC ≥ 20%	Umbral mínimo de resiliencia
Umbrales de humedad	18% y 27%	Umbrales de control volumétrico inferior y superior para simulación
Horizonte de simulación	45 días	Conjunto de datos sintéticos de energía/agua diaria
Vida económica	15 años	Modelo financiero de caso base

Subsistema agrovoltaico y energético

El subsistema agrovoltaico consiste en módulos fotovoltaicos elevados instalados sobre o junto a una parcela hortícola, utilizando una relación de cobertura del suelo compatible con sombreado parcial de cultivos, acceso para mantenimiento y flujo de aire. El diseño físico debe ajustarse según la tolerancia del cultivo, latitud, cargas de viento durante huracanes, exposición a la corrosión y normas locales de construcción. La salida PV se dirige a una etapa MPPT DC-DC analógica y luego a un bus DC de 48 V acoplado al banco de baterías, el controlador de la bomba, las válvulas solenoides, los sensores y las cargas auxiliares.

El rendimiento energético fotovoltaico diario se aproxima mediante la Ecuación (1): $E_{PV,d} = P_{PV,valorado} \times H_{PSH,d} \times PR$ (1) donde $E_{PV,d}$ es el rendimiento energético diario del PV, $P_{PV,valorado}$ es la capacidad fotovoltaica nominal, $H_{PSH,d}$ es el valor equivalente diario entre hora punta-sol y PR es la relación de rendimiento. Esta expresión se usa únicamente para el cribado de energía de primer orden; un ensayo de campo debe utilizar monitorización fotovoltaica conforme a IEC 61724-1 (Comisión Electrotécnica Internacional, 2017).

Modelo hidráulico y de riego

El requerimiento de energía hidráulica se estimaba a partir de la energía hidráulica teórica corregida por la eficiencia de la bomba, el motor y el convertidor. En la práctica, los pequeños sistemas de bombeo solar suelen estar dominados por la eficiencia a carga parcial, las pérdidas de filtro, el comportamiento de arranque-parada y las pérdidas en la regulación de presión. Para el conjunto de datos sintético, se aplicó una intensidad energética conservadora de 0,25 kWh m⁻³ al volumen de riego RESILIA. El programa convencional de goteo se calculó a partir de la evapotranspiración diaria de los cultivos y la eficiencia del riego, mientras que la demanda de riego agrícola incluía una reducción asumida del 18% en la evapotranspiración de los cultivos y una mejora de la eficiencia en el manejo por goteo.

La relación conceptual de potencia hidráulica está dada por la ecuación (2):

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del agua, g es la aceleración gravitatoria, Q es el caudal y H es la altura dinámica total.

Núcleo de control electrónico discreto y de seguridad

El núcleo electrónico está diseñado intencionadamente sin dependencia del software. Las señales de los sensores analógicos se convierten en valores en el dominio del voltaje o del dominio de la frecuencia, comparados con referencias umbral y procesados por lógica CMOS, pestillos y circuitos de temporización, siguiendo la lógica de diseño más amplia de la electrónica analógica determinista y comprobable (Dalporto et al., 2026; Horowitz & Hill, 2015; Sedra & Smith, 2015). La bomba solo puede arrancar si se cumplen simultáneamente cuatro condiciones de hardware: humedad del suelo por debajo del umbral inferior, SOC de la batería o voltaje por encima del umbral mínimo, nivel de agua disponible y sin fallo de protección. La bomba se detiene si la humedad del suelo alcanza el umbral superior, la batería baja del umbral de seguridad, el depósito de agua se vacía, se detecta sobrecorriente o expira el tiempo máximo de riego.

La condición de capacidad de bombeo se expresa como Ecuación (3):

$$\text{PUMP_ON} = \text{DRY_SOIL} \text{ Y } \text{BATTERY_OK} \text{ Y } \text{WATER_OK} \text{ Y } \text{NO_FAULT} \quad (3)$$

La condición de reinicio se expresa como Ecuación (4):

$$\text{PUMP_OFF} = \text{WET_SOIL} \text{ O } \text{LOW_BATTERY} \text{ O } \text{DRY_TANK} \text{ O } \text{SOBRECORRIENTE} \text{ O } \text{MAX_TIME} \quad (4)$$

Tabla 3*Diseño discreto-electrónico por bloque funcional.*

Bloquear	Implementación recomendada	Función
Detección de voltaje fotovoltaico	Divisor de alto valor + amplificador operacional de búfer	Escala el voltaje del bus PV a dominio analógico de 0-5 V; incluye filtrado anti-alias RC.
Detección de corriente fotovoltaica	Derivación de bajo óhmico + amplificador diferencial	Proporciona señal de corriente para la estimación de potencia y la detección de sobrecorriente.
MPPT analógico	Multiplicador AD633 + detector de pendiente + integrador	Genera una señal proporcional a la potencia y ajusta el ciclo de trabajo de PWM hacia el punto de máxima potencia.
Generación PWM	Comparador de rampa derivado de TL494/SG3525 o NE555	Acciona la etapa MOSFET DC-DC usando un voltaje analógico de control de servicio.
Protección de la batería	Comparadores LM393/LM311 + histéresis	Implementa enclavamientos de subtensión, sobretensión y carga/descarga.
Acondicionamiento de humedad del suelo	Oscilador de sonda capacitiva + convertidor F/V	Convierte la variación de humedad relacionada con el dieléctrico en una señal de tensión estable.
Umbral de riego	Comparadores Schmitt	Define umbrales de humedad inferior y superior para evitar el vibración del relé.

Memoria lógica	Pestillo CD4013 + lógica Schmitt NAND CD4093	Almacena el estado de riego y aplica reinicios de fallo.
Protección de temporización	NE555/CD4060	Limita el tiempo máximo de funcionamiento de la bomba e impone intervalos de bloqueo o reintentos.
Accionamiento de la bomba	Controlador MOSFET o contactor DC + flyback/snubber	Interruptores bombean y válvulas mientras protegen contactos y semiconductores.
Protección contra sobretensiones/rayos	Fusible, TVS, MOV, GDT, conexión a tierra	Protege la entrada fotovoltaica, el bus de corriente continua y las líneas de sensores contra transitorios.

Figura 1

Arquitectura funcional de RESILIA-AGRO-DR que muestra la separación entre el control crítico de hardware y la supervisión opcional de la IA.

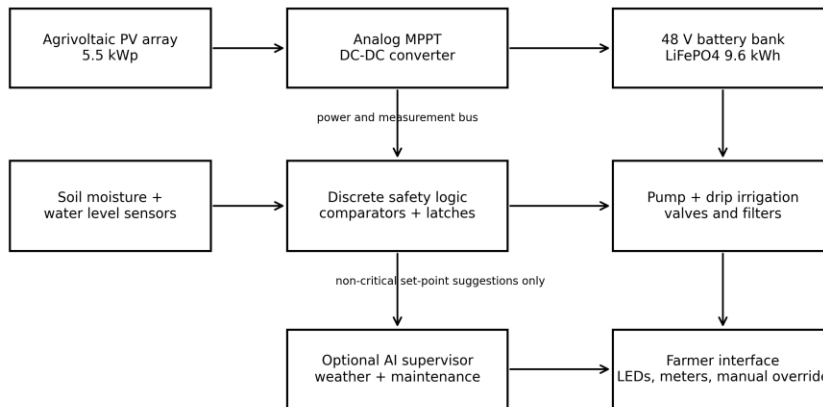
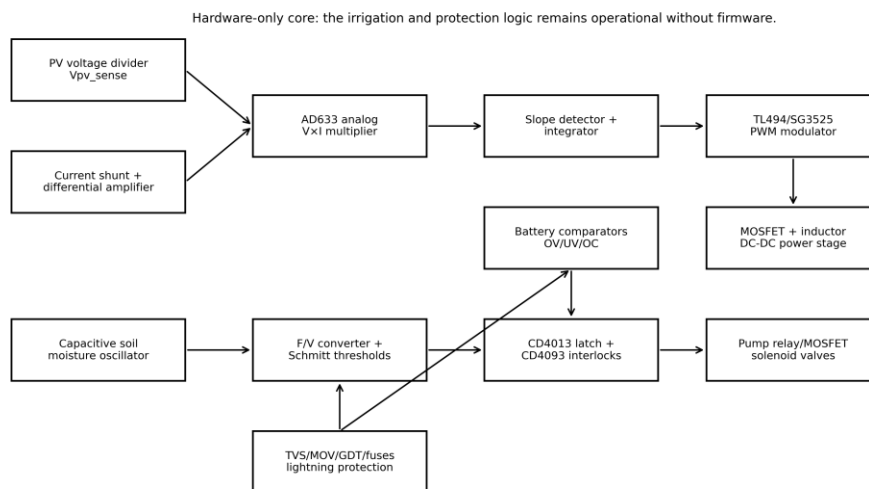


Figura 2

Diseño de bloques electrónicos para el núcleo analógico-discreto de energía, protección y control de riego.



Supervisor opcional de inteligencia artificial

La capa opcional de IA recibe variables registradas como la producción fotovoltaica, el voltaje de la batería, los ciclos de bombeo, las tendencias de humedad del suelo, eventos de lluvia y alarmas de mantenimiento. Una separación similar entre el control primario de microredes y la optimización supervisora es coherente con los conceptos de control jerárquico en la investigación de microredes (Hatziaargyriou et al., 2007; Olivares et al., 2014). Sus funciones se limitan a recomendaciones por puntos de consigna, mantenimiento predictivo, programación de riego informada por el tiempo y resultados de asesoramiento a agricultores. La capa de IA puede sugerir ajustes de umbral mediante un convertidor digital-analógico o una referencia PWM filtrada, pero los comparadores de hardware conservan la autoridad final. Este diseño evita intencionadamente que un defecto de software, una alucinación del modelo, un ciberataque o fallo de conectividad obliguen a un funcionamiento inseguro de la bomba.

Procedimiento de simulación sintética

Se generó un conjunto de datos sintético de 45 días utilizando una semilla aleatoria fija para la reproducibilidad. Se muestrearon las horas de máxima duración diarias alrededor de una media tropical, con eventos de nubes y lluvias impuestos en días seleccionados. La salida PV se calculaba desde la matriz de 5,5 kWp y una relación de rendimiento de 0,76. La demanda de riego convencional se calculó a partir de la evapotranspiración de los cultivos, la superficie y la eficiencia del riego. La demanda de riego de RESILIA incluía un factor de reducción de evapotranspiración agrivoltaica y control basado en la demanda. El SOC de la batería se propagaba con una capacidad de 9,6 kWh, 90% de eficiencia de carga y 92% de eficiencia de descarga. Se utilizó una simulación separada de humedad del suelo cada 14 días cada hora para visualizar la activación del bombeo umbral de Schmitt.

Protocolo experimental de validación para el prototipo físico**Tabla 4***Propuesta de protocolo de validación de campo para un prototipo experimental.*

Variable	Método de medición	Frecuencia	Indicador primario
Rendimiento PV	registrador de voltaje/corriente de corriente continua; Referencia de irradiancia	Intervalos de 1-5 minutos	Rendimiento diario, PR y autonomía energética
Resiliencia de las baterías	Monitor de batería; Voltímetro independiente	Intervalos de 1-5 minutos	Mínimo SOC, eventos de subvoltaje, tiempo de recuperación
Humedad del suelo	Sondas capacitivas calibradas; Comprobaciones gravimétricas	Intervalos de 10 minutos	Tiempo dentro de la banda de control del 18-27%
Volumen de agua	Medidor de caudal en línea y validación a nivel de tanque	Por evento/diario	producción de cultivo día ⁻¹ y m ³ kg ⁻¹
Respuesta de los cultivos	Masa de rendimiento, clasificación de calidad, fenología	Semanal/cosecha	Rendimiento, síntomas de estrés y fracción comercializable

Microclima	Temperatura del aire/suelo y humedad relativa	Intervalos de 10 minutos	Reducción del estrés térmico y proxy de evapotranspiración
Fiabilidad	Registro de fallos, arranques de bombas, ciclos de relés	Basado en eventos	Tiempo medio entre la avería y la complejidad de reparación
Insumos económicos	Combustible, mano de obra, mantenimiento y precios de la cosecha	Mensual	Retorno de la liquidación, NV y sensibilidad

Análisis económico

El análisis económico utilizó un coste de capital base de 12.310 USD y beneficios brutos anuales de 2.615 USD derivados de la evitación de reactivos diésel o de red, reducción de la mano de obra de riego, ahorro de agua, mejora de la productividad agrícola y servicios auxiliares de energía agrícola. La operación y el mantenimiento anuales se fijaron en 370 USD. Se utilizaron una vida útil de 15 años y una tasa de descuento del 8% para el cribado del valor presente neto. Estos valores no son comillas; son supuestos en fase de diseño que deben ser reemplazados por precios de proveedores locales, aranceles, ingresos de los cultivos y registros de mantenimiento.

RESULTADOS

Dimensionamiento de energía

Tabla 5

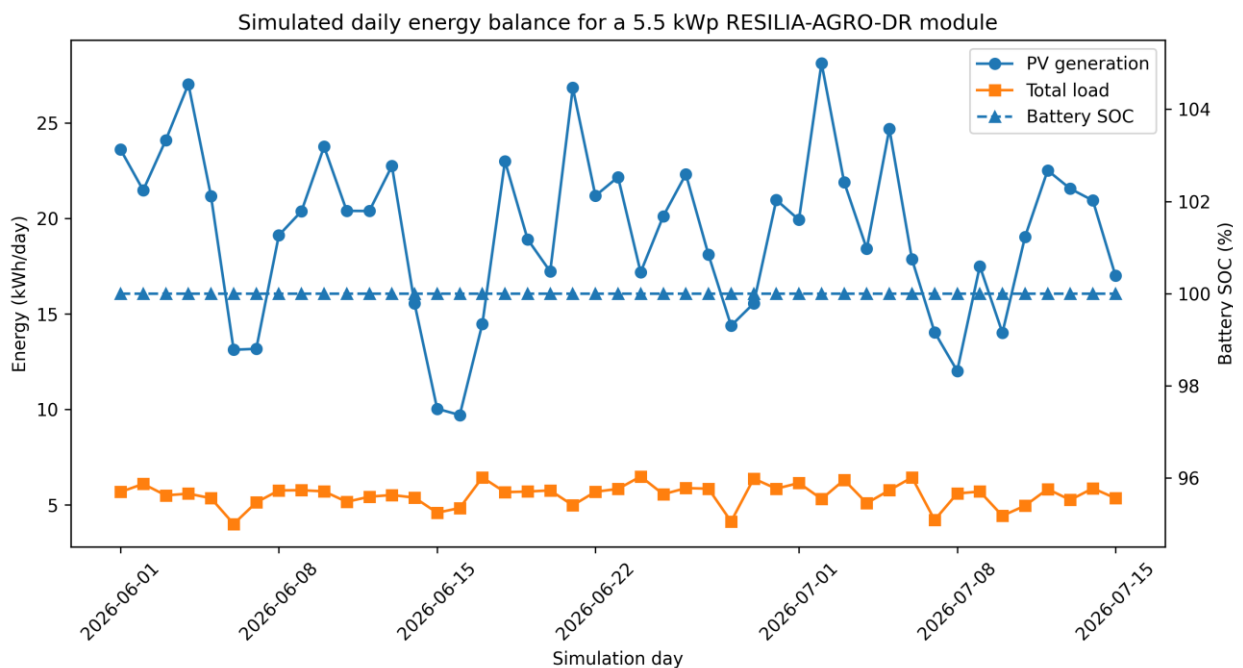
Resumen de la dimensionación de energía y simulación sintética.

Indicador	Valor	Comentario
Capacidad de la matriz fotovoltaica	5,5 kWp	Módulos de 10 × 550 Wp
Recurso solar simulado medio	4,61 kWh m ⁻² día ⁻¹	Secuencia sintética de 45 días
Rendimiento medio diario de PV	19,28 kWh día ⁻¹	Capacidad fotovoltaica × PSH × RP
Agua media de riego bajo RESILIA	3,58 m ³ día ⁻¹	Riego por goteo agrícola basado en la demanda
Energía media de la bomba	0,90 kWh día ⁻¹	0,25 kWh m ⁻³ de intensidad asumida
Carga total media	5,50 kWh día ⁻¹	Bomba + control + AI/leñador + cargas auxiliares
Capacidad de la batería	9,6 kWh	48 V, 200 Ah LiFePO ₄
SOC mínimo simulado al final del día	100.0%	Umbral de resiliencia superior al 20%
Cumplimiento de la autonomía	100.0%	Días con SOC ≥ 20%

La secuencia sintética indica que la capacidad PV seleccionada de 5,5 kWp es suficiente para el módulo de riego de referencia y las cargas agrícolas auxiliares bajo las condiciones asumidas. La gran diferencia entre la energía fotovoltaica generada y la carga esencial es intencionada: el módulo está diseñado no solo como fuente de bomba, sino como un nodo de resiliencia que puede soportar la recuperación de baterías, iluminación, comunicaciones, refrigeración de bajo consumo, tratamiento de agua o cargas comunitarias de emergencia.

Figura 3

Generación simulada diaria de energía fotovoltaica, carga total y estado de carga de la batería al final del día.



Riego simulado y control de la humedad del suelo

A lo largo de la simulación de 45 días, la planificación convencional por goteo requería $4,63 \pm 1,83 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$, mientras que el calendario agrícola basado en la demanda RESILIA requería $3,58 \pm 1,52 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$. Esto corresponde a una reducción media simulada del 22,6% en el uso de agua. El modelo horario suelo-humedad muestra que el control del umbral de Schmitt puede evitar ciclos rápidos de bombeo manteniendo la humedad dentro de la banda operativa prevista.

Figura 4

Trayectoria simulada de suelo-humedad utilizando umbrales inferiores y superiores de Schmitt para el control de la bomba.

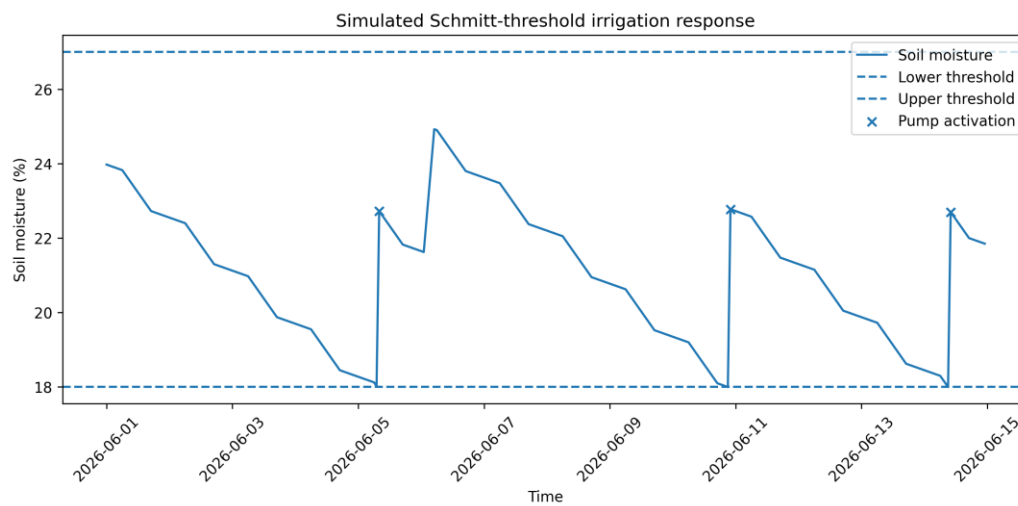
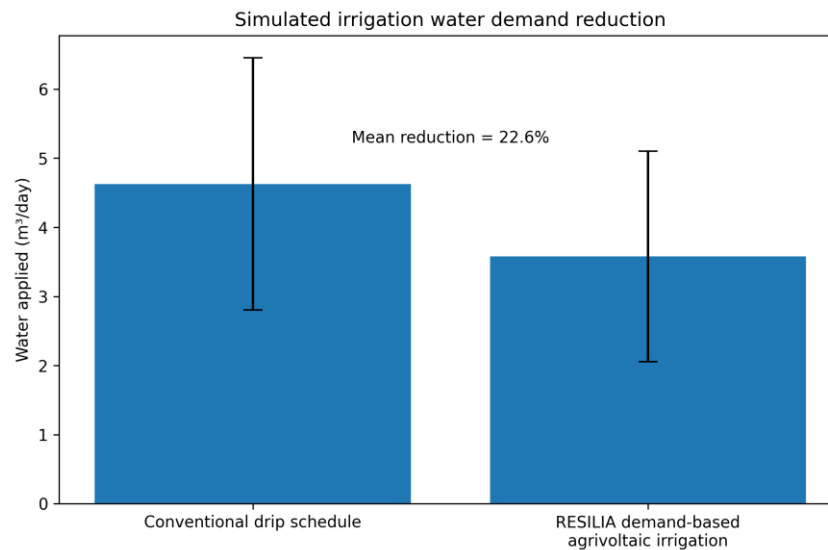


Figura 5

Demanda simulada de agua para riego bajo programación convencional y control agrícola basado en la demanda RESILIA.

**Extracto del conjunto de datos sintético de campo/simulación****Tabla 6**

Extracto del conjunto de datos de simulación sintética de 45 días.

Fecha	PSH	Lluvia (mm)	PV kWh	Conv. agua m ³	RESILIA agua m ³	Carga kWh	SOC %
2026-06-01	5.65	0.0	23.61	4.97	3.9	5.67	100.0
2026-06-02	5.14	0.0	21.48	5.11	4.0	6.09	100.0
2026-06-03	5.77	0.0	24.11	5.88	4.61	5.49	100.0

2026-06-04	6.47	0.0	27.04	5.52	4.33	5.58	100.0
2026-06-05	5.06	0.0	21.16	4.44	3.48	5.34	100.0
2026-06-06	3.14	14.0	13.12	0.0	0.0	3.99	100.0
2026-06-07	3.15	4.5	13.17	2.67	1.33	5.12	100.0
2026-06-08	4.57	0.0	19.12	4.99	3.92	5.75	100.0
2026-06-09	4.87	0.0	20.38	5.65	4.43	5.76	100.0
2026-06-10	5.68	0.0	23.76	5.87	4.6	5.7	100.0
2026-06-11	4.88	0.0	20.4	5.82	4.56	5.15	100.0
2026-06-12	4.88	0.0	20.39	4.91	3.85	5.42	100.0

El conjunto completo de datos que acompaña a este manuscrito se proporciona como un archivo CSV. El conjunto de datos está destinado a la reproducibilidad de las cifras y a la transparencia preliminar en la revisión por pares. No debe describirse como datos de campo medidos.

Resultados económicos

Tabla 7

Suposiciones de coste de capital en el caso base para el cribado económico.

Concepto de coste	USD	Comentario
Módulos fotovoltaicos, 5,5 kWp	2,310	Se supone que el coste del módulo W-1 se supone de 0,42 USD
Estructura de montaje agrivoltaica	2,200	Soporte galvanizado/aluminio elevado, escala para pequeños propietarios
Banco de baterías LiFePO4 de 48 V, 200 Ah	2,400	Batería más BMS y carcasa
Bomba, filtros y accesorios hidráulicos	1,100	Bomba de corriente continua, regulación de presión y hardware de funcionamiento en seco
Controlador discreto-electrónico	650	MPPT analógico, comparadores, pestillos, temporización y PCB/carcasa
Red de riego por goteo	1,000	Emisores, línea principal, válvulas y accesorios
Sensores y protección eléctrica	550	Sondas de humedad, indicación de flujo, TVS/MOV/GDT, fusibles

Instalación, formación y puesta en servicio	1,250	Formación local de mano de obra y usuarios
Contingencia de ingeniería	850	Repuestos y reserva de diseño
CAPEX estimado total	12,310	Estimación de diseño en el caso base

Mesa 8

Rendimiento económico en el caso base utilizando beneficios simulados/asumidos.

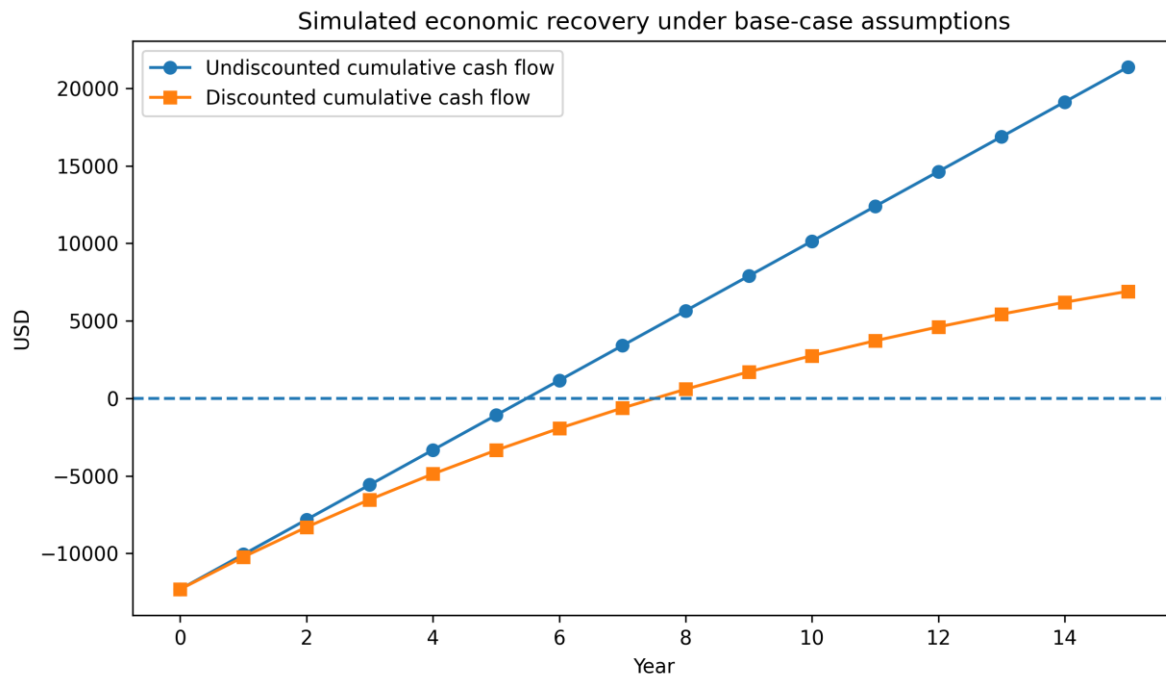
Concepto económico	Valor	Comentario
Se evitó el mantenimiento de diésel/red de respaldo y generadores	1,115	Servicios energéticos para riego y cargas agrícolas auxiliares
Reducción de la mano de obra de riego y pérdidas en la gestión del agua	600	Riego basado en la demanda y supervisión manual reducida
Productividad y mejora de la calidad de los cultivos	900	Beneficio conservador atribuido a la estabilidad del agua y sombra parcial
Beneficio anual bruto	2,615	Suma de los beneficios anuales asumidos
O&M anual	-370	Aproximadamente el 3% del CAPEX
Beneficio neto anual	2,245	Beneficio bruto menos O&M
Simple devolución	5,5 años	CAPEX / beneficio anual neto

Valor rebajado del valor en
15 años al 8%
6.906 USD

Cribado financiero basado en
el caso base

Figura 6

Recuperación acumulativa de flujo de caja en el caso base para el módulo simulado RESILIA-AGRO-DR.



Comparación con sistemas comerciales representativos

La comparación comercial no es una recomendación de compra; Es un análisis de posicionamiento. Productos comerciales de bombeo solar como LORENTZ PS2 y Grundfos SQFlex proporcionan bombeo solar maduro, funciones de control integradas y opciones de monitorización (Grundfos, 2026; LORENTZ, 2026). SunCulture ofrece paquetes de riego solar orientados a pequeños productores y modelos de financiación/servicios (SunCulture, 2026). RESILIA-AGRO-DR se diferencia porque se propone como una plataforma de resiliencia

agrivoltaica con riego a prueba de fallos por hardware, mantenibilidad local de electrónica discreta y supervisión opcional de IA.

Tabla 9

Posicionamiento de RESILIA-AGRO-DR frente a sistemas representativos de riego solar.

Sistema	Orientación primaria	Fortalezas	Diferenciación/limitaciones
LORENTZ PS2	Bombeo solar con controlador, registro de datos y servicio remoto pumpMANAGER	Plataforma de bombeo de alta calidad, monitorización, ingeniería de bombas solares maduras	No es principalmente una plataforma de protección de cultivos agrícolas; La arquitectura de control es específica de cada producto y no está pensada como hardware educativo abierto y electrónico discreto
Grundfos SQFlex	Bomba de energía renovable con inversor incorporado para operación solar/eólica/AC	Familia robusta de bombas, flexibilidad AC/DC, protección del motor	Optimizado como producto de bomba en lugar de microrrede integrada agua-energía-alimentos con lógica de riego solo por hardware
Paquetes SunCulture RainMaker / ClimateSmart	Paquetes de riego solar para pequeños productores con	Modelo sólido de servicio al agricultor, accesibilidad al riego	Oferta de mercado en lugar de plataforma de investigación abierta; énfasis limitado en el diseño de

	instalación/soporte y opciones de batería	y orientación a la financiación	seguridad electrónica discreta
RESILIA-AGRO-DR	Nodo de resiliencia al riego solar agrivoltaico con núcleo analógico-discreto y supervisor de IA opcional	Sombreado integrado de cultivos, ahorro de agua, seguridad autónoma, reparabilidad local, valor educativo/investigador	Requiere validación de prototipos, certificación, robusteza y optimización de costes antes de la comercialización

DISCUSIÓN

La principal contribución del sistema propuesto no reside en el uso aislado de paneles solares, baterías o control MPPT, sino en la integración de estos elementos dentro de una plataforma resiliente orientada a comunidades vulnerables. La literatura sobre microredes ha establecido que la agregación local de generación distribuida, almacenamiento y cargas controlables puede mejorar la confiabilidad y permitir operación aislada ante fallas de la red principal (Lasseter et al., 2002; Parhizi et al., 2015). Sin embargo, muchas soluciones contemporáneas dependen de controladores digitales, software propietario o plataformas de comunicación. En contraste, la arquitectura propuesta mantiene una capa crítica de control mediante electrónica discreta y analógica, lo que favorece trazabilidad física, mantenibilidad local y operación segura incluso ante ausencia de conectividad. Además, el componente agrivoltaico añade un valor diferencial al permitir que la infraestructura energética contribuya simultáneamente a la producción agrícola, la reducción de estrés térmico y el aprovechamiento eficiente del suelo, en línea con estudios previos sobre microclima, productividad agrícola y

sistemas fotovoltaicos móviles o elevados (Marrou et al., 2013; Valle et al., 2017). Desde una perspectiva regional, este enfoque es coherente con la necesidad latinoamericana y caribeña de soluciones renovables descentralizadas, resilientes y adaptadas a condiciones climáticas, sociales y territoriales específicas (Organización Latinoamericana de Energía, año). Los resultados de la simulación indican que la arquitectura propuesta es técnicamente plausible como un nodo energético agrícola resiliente. El excedente energético observado en el caso base no debe interpretarse solo como sobredimensionamiento. En el diseño de resiliencia rural, la generación fotovoltaica diurna excedente tiene valor cuando puede recargar baterías tras periodos nublados, soportar cargas agrícolas auxiliares, alimentar comunicaciones, hacer funcionar pequeños dispositivos de refrigeración o proporcionar servicios comunitarios de emergencia. La capacidad seleccionada de 5,5 kWp refleja por tanto un diseño orientado a la resiliencia en lugar de un diseño de coste mínimo basado solo en bombas.

La reducción de la demanda de agua observada en el conjunto de datos sintético surge de dos supuestos: reducción parcial agrivoltaica de la evapotranspiración y riego basado en umbrales, en lugar de una programación fija. Estos valores deben validarse experimentalmente para cada cultivo y microclima. En algunos cultivos, la sombra puede mejorar el rendimiento o la calidad; en otros, la sombra excesiva puede reducir la fotosíntesis y la productividad. El diseño agrícola adecuado requiere cobertura del suelo específica para el cultivo, altura de los paneles, separación de hileras y gestión estacional.

La contribución electrónica de este trabajo es el uso explícito de electrónica discreta para el control crítico para la seguridad. En los sistemas de riego inteligente convencionales, el firmware suele realizar lecturas de sensores, comparación de umbrales, temporización y actuación. El enfoque propuesto sigue el argumento de que el hardware discreto transparente puede mejorar la auditabilidad, la trazabilidad metrológica y la reparabilidad local en sistemas críticos seleccionados (Dalporto et al., 2026). RESILIA-AGRO-DR traslada estas funciones a

comparadores analógicos, pestillos, temporizadores e interbloqueos. Esto no rechaza la inteligencia digital; más bien, asigna inteligencia digital a la optimización no crítica mientras preserva el comportamiento determinista del hardware para la operación fundamental.

Esta separación es especialmente relevante en contextos donde la capacidad de mantenimiento a largo plazo puede ser más importante que la sofisticación algorítmica. Un comparador de umbral de humedad fallido puede diagnosticarse con un multímetro y reemplazarse localmente. Una plataforma de riego dependiente de la nube puede requerir credenciales de red, actualizaciones de firmware, soporte propietario o módulos de reemplazo. Para la tecnología rural financiada por el gobierno, la reparabilidad y la transparencia no son secundarias; son requisitos de sostenibilidad.

El análisis económico sugiere que la plataforma puede ser viable cuando sustituye al diésel o a un respaldo de red poco fiable, al mismo tiempo que genera beneficios agronómicos y laborales. El retorno es menos favorable si el sistema se utiliza únicamente para riego de bajo consumo energético sin cargas productivas auxiliares. Por lo tanto, el modelo de despliegue más sólido es un nodo multipropósito de resiliencia agrícola: riego, protección de cultivos, batería de respaldo, iluminación, comunicaciones, tratamiento de agua y recogida de datos.

Posicionamiento de patentes e innovación

Las posibles reclamaciones de propiedad intelectual no deben enmarcarse en torno a bombeo solar genérico, agrivoltaicos genéricos o riego inteligente genérico, porque estas áreas ya están pobladas por arte previo (Dupraz et al., 2011; Efram & Chapman, 2007; LORENTZ, 2026; Weselek et al., 2019). Una afirmación más sólida se centraría en la arquitectura específica: una plataforma de riego agrícola tropical en la que las decisiones críticas para la seguridad sobre agua y energía se ejecutan mediante un núcleo de hardware electrónico discreto, mientras que un supervisor de IA está limitado a recomendaciones de puntos de ajuste no críticos a través de una interfaz limitada por hardware. Elementos protegibles

adicionales pueden incluir la integración analógica MPPT y interbloqueo de riego, la lógica de prioridad hardware para condiciones de fallo agua-energía y el diseño modular educativo/de servicio de campo.

Limitaciones

- Todos los resultados numéricos son sintéticos y deben validarse con datos de campo antes de que se afirmen el rendimiento real.
- La respuesta agronómica a la sombra depende del cultivo, la estación y el lugar.
- Los umbrales analógicos requieren calibración y pruebas de estabilidad térmica.
- Los rayos, la corrosión, la humedad y los insectos son riesgos serios de fiabilidad tropical y requieren recintos resistentes y puesta a tierra.
- Una vía completa de certificación requeriría seguridad eléctrica, EMC y evaluación mecánica de carga eólica.
- Los resultados económicos son sensibles a los precios locales, los ingresos agrícolas, el coste del diésel, las condiciones de financiación y la calidad del mantenimiento.

CONCLUSIONES

RESILIA-AGRO-DR se presenta como una plataforma modular de riego solar agrivoltaico para una agricultura rural resiliente al clima en la República Dominicana y América Latina. Su innovación central no es simplemente el uso de paneles fotovoltaicos o riego por goteo, sino la integración de protección agrícola agrícola, energía renovable apoyada por baterías, riego basado en demanda y un núcleo de seguridad solo hardware basado en electrónica analógica-discreta.

La simulación sintética indica que un módulo de 5,5 kWp con 9,6 kWh de almacenamiento en baterías puede satisfacer el perfil de riego de referencia y carga auxiliar bajo supuestos representativos, mantener el SOC de la batería por encima del umbral de

resiliencia y reducir la demanda de agua de riego en aproximadamente un 22,5% en comparación con un programa convencional de goteo. El modelo económico de caso base ofrece un retorno sencillo de aproximadamente 5,5 años, asumiendo beneficios combinados en energía, mano de obra, agua y calidad de los cultivos.

El manuscrito está listo para usarse como artículo de diseño y simulación orientado a Scopus, pero una presentación más sólida en el primer y segundo trimestre requerirá datos físicos de prototipo, al menos un ciclo de cultivo, rendimiento fotovoltaico medido, validación calibrada de humedad del suelo, estadísticas de rendimiento de cultivos, registros de fallo y un análisis completo de sensibilidad. Con estas incorporaciones, RESILIA-AGRO-DR puede convertirse en una plataforma de investigación sólida, una propuesta de financiación gubernamental y una base creíble para la transferencia de tecnología o la exploración de patentes.

Declaración de conflicto de interés

El autor declara no tener ningún conflicto de interés relacionado con esta investigación. Asimismo, manifiesta que el diseño conceptual, la interpretación técnica, la redacción científica y las conclusiones del presente trabajo no han sido influenciados por intereses comerciales, financieros, institucionales o personales que pudieran afectar la objetividad académica del manuscrito.

Declaración de contribución a la autoría

Baldo Alberto Luigi Dalporto: conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, diseño tecnológico, desarrollo de la arquitectura electrónica, validación conceptual, visualización, administración del proyecto, supervisión, redacción del borrador original, revisión y edición de la redacción.

Declaración de uso de inteligencia artificial

El autor declara que utilizo herramientas de inteligencia artificial únicamente como apoyo auxiliar en tareas de organización, revisión lingüística, estructuración académica, mejora de claridad expositiva y verificación preliminar de coherencia textual. El uso de estas herramientas no sustituyó de ninguna manera el proceso intelectual, técnico, científico, metodológico ni crítico desarrollado por el autor.

Después de realizar revisiones rigurosas con diferentes herramientas de comprobación y control académico, incluyendo verificación de originalidad, revisión de coherencia bibliográfica y control de plagio, el autor manifiesta que el contenido científico, la interpretación técnica, el diseño conceptual, las decisiones metodológicas, la discusión y las conclusiones del manuscrito son producto de trabajo intelectual propio. Asimismo, declara que este trabajo no ha sido escrito, publicado ni depositado previamente en ninguna plataforma electrónica, editorial, académica o de inteligencia artificial como obra independiente.

El autor asume plena responsabilidad por la integridad, exactitud, originalidad, revisión crítica y contenido final del artículo.

REFERENCIAS

Agencia Internacional de Energías Renovables. (2025). Estadísticas de energías renovables 2025. IRENA.

Agencia Internacional de Energías Renovables. (2025). Perfil estadístico de energías renovables en República Dominicana. IRENA.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Evapotranspiración de cultivos: Directrices para calcular los requisitos de agua de cultivos (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Banco Mundial. (2023). Informe sobre clima y desarrollo del país de la República Dominicana.

Grupo Banco Mundial.

Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P., & Macknick, J.

E. (2019). Los agrivoltaicos ofrecen beneficios mutuos a través del nexo comida-energía-agua en tierras secas. *Sostenibilidad de la naturaleza*, 2, 848-855.

<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>

Comisión Electrotécnica Internacional. (2010). IEC 62109-1: Seguridad de los convertidores de potencia para su uso en sistemas fotovoltaicos - Parte 1: Requisitos generales. IEC.

Comisión Electrotécnica Internacional. (2017). IEC 61724-1: Rendimiento de sistemas fotovoltaicos - Parte 1: Monitorización. IEC.

Dalporto, B. A. L., Mary, S., & Gallur, S. (2026). La importancia de la electrónica discreta en aplicaciones biomédicas: Fiabilidad, verificabilidad y resiliencia tecnológica en sistemas críticos de salud. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 7(1), 3149-3155. <https://doi.org/10.56712/latam.v7i1.5501>

Departamento de Comercio de EE. UU., Administración de Comercio Internacional. (2026). República Dominicana - Energías renovables: Guía comercial del país. Consultado el 2 de mayo de 2026 desde <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/dominican-republic-renewable-energy>

Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). El potencial de los sistemas agrovoltaicos. *Revisiones sobre energías renovables y sostenibles*, 54, 299-308.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combinar paneles solares fotovoltaicos y cultivos alimentarios para optimizar el uso del suelo:

- hacia nuevos proyectos agrícolas. *Energía Renovable*, 36(10), 2725-2732.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Esrarn, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparación de técnicas de seguimiento máximo de puntos de potencia en paneles fotovoltaicos. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439-449. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874230>
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2005). Optimización de perturbaciones y método de seguimiento de puntos de máxima potencia. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), 963-973. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2005.850975>
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). Sobre la coexistencia de la conversión de energía solar y el cultivo de plantas. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55-69.
<https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
- Grundfos. (2026). Bombas sumergibles de energía renovable SQFlex. Consultado el 2 de mayo de 2026 desde <https://product-selection.grundfos.com/products/sqflex>
- Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Mamay, C. (2007). Microredes. *Revista IEEE Power and Energy*, 5(4), 78-94. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583>
- Hohm, D. P., & Ropp, M. E. (2003). Estudio comparativo de algoritmos de seguimiento de puntos de máxima potencia. *Progreso en fotovoltaica: investigación y aplicaciones*, 11(1), 47-62. <https://doi.org/10.1002/pip.459>
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *El arte de la electrónica* (3ª ed.). Cambridge University Press.
- Jain, S., & Agarwal, V. (2007). Comparación del rendimiento de los esquemas de seguimiento de puntos de máxima potencia aplicados a sistemas fotovoltaicos de una sola etapa conectados a la red. *IET Aplicaciones de Energía Eléctrica*, 1(5), 753-762.
<https://doi.org/10.1049/iet-epa:20060475>
- Lasseter, R. H. (2002). Microredes. *Actas de la Reunión de Invierno de la IEEE Power Engineering Society*, 305-308. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985003>

LORENTZ. (2026). Sistemas de bombeo solar de agua PS2. Consultado el 2 de mayo de 2026 desde <https://www.lorentz.de/products-and-technology/products/ps2-solar-pumping-systems/>

Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productividad y eficiencia en el uso de radiación de las lechugas cultivadas en la sombra parcial de paneles fotovoltaicos. *European Journal of Agronomy*, 44, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>

Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Canizares, C. A., Irvani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A. H., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, M., Palma-Behnke, R., Jimenez-Estevez, G. A., & Hatziargyriou, N. D. (2014). Tendencias en el control de microrredes. *Transacciones IEEE sobre Red Inteligente*, 5(4), 1905-1919. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). Iniciativa Caribeña Resiliente: Subproyecto de nexo agua-energía-alimentos que da frutos en el Caribe. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe.

Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., & Bahramirad, S. (2015). Estado del arte en la investigación sobre microrredes: una revisión. *IEEE Access*, 3, 890-925. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2443119>

Programa Mundial de Alimentos. (2023). Plan estratégico nacional de la República Dominicana (2024-2028). Junta Ejecutiva del PMA.

Ravi, S., Macknick, J., Lobell, D., Field, C., Ganesan, K., Jain, R., Elchinger, M., & Stoltenberg, B. (2016). Oportunidades de colocation para grandes infraestructuras solares y agricultura en tierras áridas. *Energía Aplicada*, 165, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.078>

Reisi, A. R., Moradi, M. H., & Jamasb, S. (2013). Clasificación y comparación de técnicas de seguimiento de puntos de máxima potencia para sistemas fotovoltaicos: una revisión.

Revisiones sobre energías renovables y sostenibles, 19, 433-443.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.052>

Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2015). Circuitos microelectrónicos (7ª ed.). Oxford University Press.

SunCulture. (2026). Bombas solares de riego para agricultura sostenible. Consultado el 2 de mayo de 2026 desde <https://sunculture.io/>

Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M., & Christophe, A. (2017). Aumentar la productividad total de una tierra combinando paneles fotovoltaicos móviles y cultivos alimentarios. *Energía Aplicada*, 206, 1495-1507.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>

Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Enfoque integral para la modelización y simulación de paneles fotovoltaicos. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198-1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Hogy, P. (2019). Sistemas agrofotovoltaicos: aplicaciones, desafíos y oportunidades. Una reseña. *Agronomía para el Desarrollo Sostenible*, 39, Artículo 35.

<https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>

Apéndice A

Guía de conexión a nivel de bloque para el desarrollo de prototipos

Este apéndice ofrece una guía de conexión a nivel de diseño. No es un esquema de construcción certificado. Las clasificaciones de componentes, la disposición de la PCB, las distancias de aislamiento, la puesta a tierra y la protección deben ser verificadas por un ingeniero eléctrico cualificado antes de la instalación en campo.

Tabla A1*Guía de conexión a nivel prototipo por ruta de señal.*

Señal/fuente	Destino	Nota de implementación
PV+ / PV-	Desconexión de corriente continua, fusible, protección TVS/MOV/GDT, entrada analógica MPPT	Utiliza cable fotovoltaico para exteriores, protección contra sobretensiones y puesta a tierra.
Salida del divisor de tensión fotovoltaico	Entrada del buffer de amplificador operacional; canal de voltaje comparador/multiplicador	Escala el voltaje máximo de circuito abierto por debajo del rango de alimentación analógica.
Nodos de detección de derivación de corriente	Entradas diferenciales de amplificadores	Usa conexiones Kelvin y filtrado RC.
Salida AD633	Detector/integrador de taludes	Representa la potencia PV instantánea escalada.
Salida del integrador	Entrada de control de servicio TL494/SG3525	Rango de límite con abrazaderas para proteger la etapa de potencia.
Salida PWM	Controlador de puerta y puerta MOSFET	Incluye resistencias de compuerta, pull-down y desacoplamiento de alimentación de drivers.
Sensor de voltaje de batería	Comparadores de subtensión/sobretensión	Añade histéresis y corte de emergencia independiente.

Sonda de humedad del suelo	Oscilador o frontal capacitancia-voltaje	Utiliza cable blindado y encapsulación resistente a la corrosión.
Comparador de humedad BAJO	Entrada SET de CD4013 vía puerta de condición CD4093	Comienza el riego solo cuando las condiciones de batería y agua son adecuadas.
Comparador de humedad ALTO	Entrada de reinicio CD4013	Detiene el riego en el umbral superior.
Interruptor de flotador del tanque	WATER_OK entrada lógica	Es un sistema de seguridad de cable, así que el cable roto tiende a inhibir la bomba.
Comparador de sobrecorriente	Entrada de bloqueo de fallo/reinicio	Requiere un reinicio manual o con tiempo según la estrategia de seguridad.
Salida Q CD4013	Controlador MOSFET/relé de bomba	Usa optoacoplamiento si cambias los contactos ruidosos de la bomba.
Salida del temporizador NE555/CD4060	MAX_TIME reinicio de la entrada	Evita el funcionamiento continuo de la bomba tras la falla del sensor.
Salida filtrada DAC/PWM de la IA	Nodo de suma de puntos de consigna a través de límites de hardware	La IA no puede superar la ventana umbral segura definida por resistencias/abrazaderas.

Anulación manual	Conmutación de hardware mediante interbloqueos de seguridad	El funcionamiento manual sigue respetando la batería baja y el corte en seco.
------------------	---	---