

Autonomous Rainwater Harvesting System

Jhoel Incahuanaco-Yucra, Bach¹, Lizardo Castillo-Quispe, Bach¹, Fabrizzio Ochoa-Ancori, Bach¹, Carla Cuya-Zevallos, Dr¹, Edmundo Aparicio-Maldonado, Mg¹, Jaime Villegas-Medina, Mg¹, José Esquicha-Tejada, Dr¹

¹Universidad Católica de Santa María, Peru,

*jhoel.incahuanaco@estudiante.ucsm.edu.pe, lizardo.castillo@estudiante.ucsm.edu.pe,
fabrizzio.ochoa@estudiante.ucsm.edu.pe, ccuya@ucsm.edu.pe, eapario@ucsm.edu.pe,
jvillegasmedina@ucsm.edu.pe, jesquicha@ucsm.edu.pe*

Abstract- *To address the scarcity of drinking water in rural areas and regions with extreme climates, an autonomous rainwater and hail harvesting system powered by solar energy was developed. This design was based on a survey conducted with people in southern Peru to understand their water habits and needs. The system includes a stainless-steel collection cylinder with thermal resistors activated by temperature sensors to melt the hail, and sensors for rainfall, flow, and water level, all managed by a control box. The collected water is filtered and stored in a modular tank, and the entire operation is automated and monitored in real time via a web-based platform accessible via the internet. Its components are protected in a dust- and moisture-resistant cabinet. This low-maintenance and energy-efficient solution represents a practical and replicable alternative to traditional water harvesting methods, benefiting communities with limited access to this resource.*

Keywords- *Water harvesting, solar energy, automation, smart sensors, water scarcity*

Sistema Autónomo de Captación de Agua Pluvial

Jhoel Incahuanaco-Yucra, Bach¹, Lizardo Castillo-Quispe, Bach¹, Fabrizzio Ochoa-Ancori, Bach¹, Carla Cuya-Zevallos, Dr¹, Edmundo Aparicio-Maldonado, Mg¹, Jaime Villegas-Medina, Mg¹, José Esquicha-Tejada, Dr¹

¹Universidad Católica de Santa María, Peru,

jhoel.incahuanaco@estudiante.ucsm.edu.pe, lizardo.castillo@estudiante.ucsm.edu.pe,
fabrizzio.ochoa@estudiante.ucsm.edu.pe, ccuya@ucsm.edu.pe, eaparicio@ucsm.edu.pe,
jvillegasmedina@ucsm.edu.pe, jesquicha@ucsm.edu.pe

Resumen: Para enfrentar la escasez de agua potable en zonas rurales y regiones con climas extremos, se desarrolló un sistema autónomo de captación de agua de lluvia y granizo, alimentado por energía solar. Este diseño se fundamentó en una encuesta realizada a personas de la región sur del Perú, con el fin de conocer sus hábitos y necesidades hídricas. El sistema incluye un cilindro recolector de acero inoxidable con resistencias térmicas activadas por sensores de temperatura para derretir el granizo, y sensores de lluvia, flujo y nivel de agua, todos gestionados en una caja de control. El agua recolectada es filtrada y almacenada en un tanque modular, y todo el funcionamiento es automatizado y monitoreado en tiempo real desde una plataforma web accesible por internet. Sus componentes están protegidos en un gabinete, resistente al polvo y la humedad. Esta solución, de bajo mantenimiento y eficiente energéticamente, representa una alternativa práctica y replicable frente a métodos tradicionales de recolección de agua, beneficiando a comunidades con acceso limitado al recurso.

Palabras clave—Captación de agua, energía solar, automatización, sensores inteligentes, escasez hídrica.

I. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable representa uno de los retos más urgentes del presente siglo, especialmente en zonas con infraestructura deficiente y condiciones climáticas adversas. Según datos de la ONU, más de 2.000 millones de personas viven en regiones con escasez de agua, situación que tiende a agravarse con el cambio climático y el crecimiento poblacional [1]. En Perú, el Plan Nacional de Recursos Hídricos 2023 2040 reconoce esta problemática e identifica a varias regiones con alta vulnerabilidad hídrica [2]. De hecho, estimaciones del INEI indican que esta región alberga más de 1.3 millones de habitantes, muchos de los cuales enfrentan dificultades para acceder de manera continua al recurso hídrico [3]. Medios locales han advertido incluso sobre el riesgo de racionamientos en temporadas secas [4]. A lo largo de América Latina, se han propuesto soluciones para mitigar esta situación mediante sistemas de captación de agua de lluvia. Algunos, como el proyecto EKOMURO en Colombia, destacan por su bajo costo y su enfoque ambiental usando materiales reciclados [5]. Otras iniciativas, principalmente desde el ámbito académico, proponen modelos más técnicos como sistemas de captación domiciliaria [6], [7]. Sin

embargo, la mayoría carecen de automatización, monitoreo en tiempo real o uso de energías limpias.

La integración de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), sensores inteligentes y energías renovables ofrece un enfoque más moderno y eficiente para enfrentar esta problemática [8], [9]. Estos sistemas permiten recolectar datos de variables ambientales como lluvia, flujo de agua, temperatura y nivel, facilitando una gestión hídrica más precisa y remota. Experiencias exitosas en Arequipa han demostrado el potencial del IoT para optimizar el riego urbano y reducir el consumo de agua potable [10]. En ese contexto, este artículo [11] presenta el diseño e implementación de un sistema autónomo de captación de agua de lluvia y granizo, desarrollado específicamente para comunidades de la región sur. Como parte del diseño, se aplicó una encuesta a 60 personas de la región con el objetivo de identificar hábitos, necesidades y percepciones relacionadas con el uso del agua. Esta información permitió adaptar la propuesta al entorno real. El sistema integra sensores de lluvia, temperatura, nivel y flujo; un cilindro de captación con resistencias térmicas para derretir el granizo; un tanque modular de almacenamiento; una placa NodeMCU como unidad de control; y una plataforma web de monitoreo accesible desde cualquier dispositivo. Todos los componentes están protegidos por un gabinete IP68, asegurando su funcionamiento incluso en condiciones ambientales adversas.

Esta solución busca superar las limitaciones de los sistemas tradicionales mediante una propuesta escalable, energéticamente eficiente, automatizada y de bajo mantenimiento, capaz de contribuir a la resiliencia hídrica de comunidades vulnerables y avanzar hacia un modelo de gestión del agua más sostenible.

II. ANTECEDENTES

Uno de los antecedentes más relevantes en el campo es la patente [12], que presenta un sistema de captación automática de agua de lluvia basado en sensores y energía solar. Sin embargo, su aplicación está limitada únicamente a la lluvia, sin contemplar granizo ni monitoreo digital en tiempo real. En una línea similar, la patente [13] describe un sistema para recolectar agua de lluvia y nieve en invernaderos

mediante estructuras fijas, aunque también carece de funciones de automatización y control inteligente.

A diferencia de estos enfoques técnicos, existen propuestas de carácter social como el proyecto EKOMURO, el cual utiliza botellas PET recicladas para captar agua en comunidades vulnerables de Colombia. Esta solución se destaca por su bajo costo e impacto social, aunque no incorpora tecnologías digitales ni automatización [5]. En el ámbito académico, los trabajos de Quintana [7] y Darío [6] proponen sistemas domésticos de captación pluvial, útiles para entornos urbanos, pero sin integración de tecnologías IoT o monitoreo remoto.

Complementando estas experiencias, Marroquín y Trejo exploran en [14] el uso de hormigón permeable como alternativa de captación urbana, centrada en la infraestructura, pero alejada de contextos rurales o soluciones inteligentes. Este panorama de escasez también ha sido abordado desde organismos como la Fundación Aquae, que resalta la urgencia de implementar sistemas descentralizados y sostenibles frente a la crisis hídrica mundial [15]. En el ámbito de la automatización, Astutiningtyas y Suyoto [16] desarrollaron un sistema de riego con NodeMCU y sensores para jardines urbanos, funcional pero sin capacidad de captación ni almacenamiento.

En una línea más cercana a nuestra propuesta, Esquicha-Tejada y Copa-Pineda [8] analizaron alternativas de riego inteligente con IoT en jardines de Arequipa, mostrando resultados favorables en ahorro de agua. Este trabajo sentó una base técnica para el diseño de nuestro sistema. Asimismo, Vimos y Sacoto [11] demostraron la viabilidad del uso de microcontroladores como Arduino en el monitoreo de infraestructura urbana, evidenciando su potencial para aplicaciones ambientales. Finalmente, la arquitectura de comunicación basada en el protocolo MQTT ha sido detalladamente abordada por autores como Quincozes [9] y Tivani [17], aportando elementos clave que fueron integrados en el desarrollo de la plataforma digital de nuestro sistema.

II. SITUACIÓN ACTUAL

Para validar la relevancia del problema identificado en el proyecto "Sistema Autónomo de Captación de Agua Pluvial" la escasez hídrica en zonas rurales y la necesidad de soluciones sostenibles— se realizará una encuesta virtual en el sur del Perú. El objetivo es cuantificar la demanda y viabilidad del sistema propuesto. Para garantizar resultados estadísticamente representativos, se calculó el tamaño de la muestra utilizando la fórmula para poblaciones finitas:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{(N - 1) \cdot E^2 + Z^2 \cdot p \cdot q} \dots (1)$$

Población objetivo (N): Según el Censo Nacional 2017, la población total del sur del Perú es 5,776,993 habitantes (Apurímac: 405,759; Arequipa: 1,382,730; Ayacucho: 616,176; Cusco: 1,205,527; Huancavelica: 347,639; Madre de Dios: 141,070; Moquegua: 174,863; Puno: 1,172,697;

Tacna: 329,332). Esta región enfrenta estrés hídrico (-40% a -80% para 2040, según CEPLAN), lo que la convierte en el foco ideal del estudio.

Nivel de confianza (Z): Se seleccionó un 90% de confianza ($Z = 1.645$), equilibrando rigurosidad y factibilidad en la recolección de datos.

Proporción estimada (p y q): Al no existir datos previos sobre adopción de sistemas de captación de agua pluvial en la zona, se usó un valor conservador de $p = 0.5$ (máxima variabilidad), con $q = 1 - p = 0.5$.

Margen de error (d): Se aceptó un 10% de margen de error ($d = 0.1$) para reflejar la heterogeneidad geográfica y socioeconómica de la población.

Cálculo del Tamaño Muestral es:

$$n = \frac{5,776,993 \cdot (1.645)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5}{(0.1)^2 \cdot (5,776,993 - 1) + (1.645)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5}$$

$$n = \frac{5,776,993 \cdot 2.706 \cdot 0.25}{0.01 \cdot 5,776,992 + 0.6765} \approx 67.6$$

El tamaño mínimo requerido es de 68 encuestados, con quienes se trabajará para validar los datos. Esta muestra garantiza un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 10%, parámetros adecuados para el alcance exploratorio del estudio. Los participantes serán seleccionados bajo criterios de inclusión predefinidos para asegurar la representatividad de la población objetivo.

La encuesta inicial realizada, mostró un alto interés por la automatización: el 56.5 % prefirió un sistema que detecte lluvia y granizo automáticamente, el 21.7 % expresó interés moderado y solo el 13 % fue neutral. Estos resultados respaldan el enfoque tecnológico adoptado y la demanda de soluciones inteligentes con mínima intervención manual.

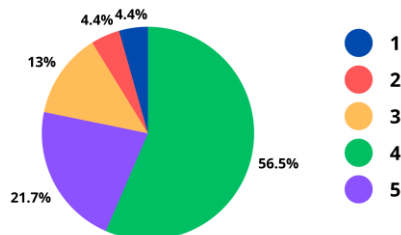


Fig 1. Encuesta sobre automatización

La encuesta también reveló una fuerte demanda por monitoreo remoto: el 56.5 % mostró alto interés en recibir alertas sobre el nivel de agua y el estado del sistema, el 21.7% tuvo interés moderado y el 17.4 % fue neutral. Estos datos justifican la inclusión de la plataforma web en tiempo real para mejorar la gestión del agua sin intervención física.

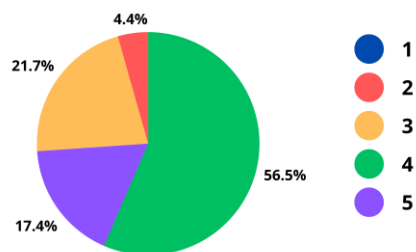


Fig 2. Encuesta sobre el monitoreo remoto

IV. MÉTODOS Y MATERIALES

La solución desarrollada consiste en un sistema compacto, autónomo y energéticamente sostenible, orientado a recolectar y almacenar agua proveniente de la lluvia y el granizo. Utiliza sensores climáticos y de nivel, controladores electrónicos, resistencias calefactoras y una interfaz web de monitoreo, todo alimentado por energía fotovoltaica. Este sistema está pensado para operar de manera independiente en zonas con acceso limitado al agua potable o donde las condiciones climáticas son extremas o variables.

A través de una estructura modular y un conjunto de componentes estratégicamente integrados, el sistema es capaz de gestionar el ciclo completo del agua: desde su recolección atmosférica, pasando por el derretimiento del granizo, el filtrado de impurezas, el almacenamiento seguro y el control digital del proceso. A continuación, se presenta la descripción detallada de los elementos físicos y electrónicos que permiten su funcionamiento continuo y eficiente:

- Sensor de lluvia Hydreon RG-9 Rain Sensor: sensor óptico sellado que detecta lluvia mediante reflexión infrarroja. Emite una señal digital al microcontrolador al detectar precipitación, siendo resistente a la intemperie y libre de mantenimiento prolongado [18].
- Sensor de temperatura DS18B20: mide la temperatura ambiente. Cuando detecta temperaturas iguales o inferiores a cierto umbral (configurable en el programa, por ejemplo 2 °C), el sistema activa automáticamente las resistencias calefactoras. Se comunica por el protocolo OneWire y se programa con librerías especializadas que permiten múltiples sensores en una sola línea [19].
- Sensor de nivel DFRobot Gravity: determina el nivel del agua en el tanque de almacenamiento. Cuando se alcanza un umbral de llenado (por ejemplo, 90 %), se desactiva la válvula de entrada y se muestra una alerta en la plataforma. Este sensor se conecta a una entrada analógica del microcontrolador [20].
- Sensor de flujo YF-S201: mide el caudal de agua mediante pulsos eléctricos generados por el paso del líquido. Estos pulsos son leídos por una entrada digital y convertidos en litros por minuto mediante una fórmula calibrada. La información permite registrar el volumen recolectado en tiempo real [21].

- Electroválvula Burkert 0330/0331 3/2 NC: controla el paso de agua dentro del sistema. La placa electrónica activa la electroválvula mediante una señal digital (alta/baja) conectada a un transistor o relé, según la necesidad del circuito de control [22].
- Placa NodeMCU ESP8266: actúa como el controlador central del sistema. Se encarga de leer los sensores, ejecutar la lógica de control, activar actuadores y enviar datos a la plataforma web mediante conexión WiFi. El programa está desarrollado en C++ usando el entorno Arduino IDE, con estructura basada en estados y timers [23].
- Módulo regulador de voltaje LM2596 (step-down): estabiliza la tensión eléctrica que recibe la placa y los sensores, reduciendo de 12V a 5V o 3.3V según el componente. No requiere programación, pero es clave para proteger el sistema.
- Batería de litio 12V 12Ah: almacena la energía generada por el panel solar. Aunque no tiene lógica de control propia, su nivel de carga es monitoreado indirectamente desde el sistema para determinar autonomía energética.
- Panel solar fotovoltaico 12V: fuente de alimentación primaria del sistema. Proporciona la energía necesaria para cargar la batería y alimentar todos los elementos electrónicos.
- Módulo relé 1 canal SRD-05VDC-SL-C: permite activar cargas externas de 12 V, como la electroválvula, a partir de señales digitales de bajo voltaje emitidas por la NodeMCU. Aísla el controlador del circuito de potencia y garantiza seguridad en la conmutación.
- Optoacoplador PC817 (con divisor resistivo): se utiliza para adaptar señales digitales provenientes de sensores con salida de 5 V, como el Hydreon RG-9, protegiendo a la NodeMCU, que trabaja a 3.3 V. También permite aislamiento eléctrico [24].
- Resistencia de inmersión en acero inoxidable 12 V 50 W: elemento calefactor tubular diseñado para operar directamente en contacto con el agua o el granizo recolectado en el cilindro. Se activa automáticamente según la lectura del sensor de temperatura, permitiendo derretir el hielo de forma rápida y eficiente sin riesgo de corrosión ni cortocircuito.

Todos los componentes electrónicos descritos anteriormente se encuentran organizados dentro de una caja de control sellada, con protección IP68, la cual protege el cableado, las conexiones y la placa principal de posibles filtraciones de agua o ingreso de polvo. Esta caja, junto con el cilindro recolector de acero inoxidable y el sistema de filtrado, se ubican en el interior de un gabinete principal fabricado con materiales resistentes al ambiente exterior. Esta estructura garantiza la estabilidad del sistema, la protección ante condiciones climáticas adversas y la integración física de todos los elementos funcionales.

A continuación, se presenta una tabla comparativa con los costos estimados de cada uno de los componentes

utilizados, con el fin de ofrecer una visión general sobre la viabilidad económica del sistema propuesto.

TABLA I
PRESUPUESTO

Componente	Precio (USD)
Sensor de lluvia Hydreon RG-9	\$30
Sensor de temperatura DS18B20	\$3.00
Sensor de nivel de agua DFRobot Gravity	\$11.90
Sensor de flujo YF-S201	\$6.00
Válvula solenoide Burkert 0330/0331 (3/2 NC)	\$38.00
Placa NodeMCU ESP8266	\$5.50
Regulador de voltaje LM2596 (reductor/step-down)	\$1.50
Batería de litio de 12V 12Ah	\$38.00
Panel solar fotovoltaico de 12V (30-50W)	\$32.00
Módulo de relé de 1 canal 5V (SRD-05VDC)	\$2.00
Optoacoplador PC817 + resistencias	\$1.20
Elemento calefactor de acero inoxidable 12V 50W	\$6.00
Total estimado	\$174.10 USD

La tabla presenta una estimación de los costos asociados a los componentes electrónicos que conforman el sistema autónomo de captación de agua pluvial, alcanzando un total aproximado de \$174.10 USD. Esta cifra refleja una selección eficiente de dispositivos que equilibran rendimiento, durabilidad y bajo consumo energético, permitiendo una operación autónoma con mínimo mantenimiento. Estos componentes se pueden observar en la Fig. 3.

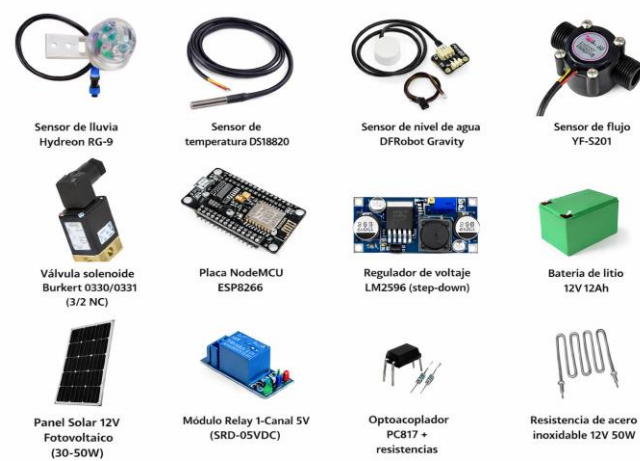


Fig. 3. Componentes de la propuesta

El diseño físico del prototipo está organizado de forma compacta, con todos los componentes electrónicos alojados dentro de una caja de control sellada, ubicada en el interior de un gabinete principal resistente al ambiente exterior, como se puede ver en la fig. 4.

Este gabinete también contiene el cilindro recolector, el cual está conectado al sistema de filtrado y calefacción, y cumple la función de recibir el agua o el granizo captado. Esta

disposición garantiza la protección del sistema ante condiciones climáticas adversas y facilita su instalación en distintos entornos (ver fig. 5). Se prevé un prototipo visual de la plataforma digital, en el cual se representan las funciones clave de monitoreo y control del sistema. Esta interfaz permite, visualizar en tiempo real parámetros como temperatura, nivel de agua, estado de sensores y capacidad energética, ofreciendo al usuario una experiencia accesible y centralizada desde cualquier dispositivo conectado a internet.

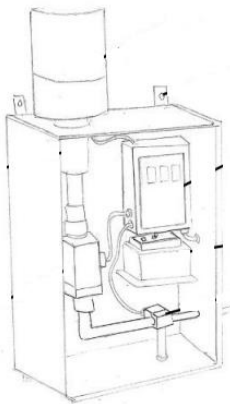


Fig. 4. Gabinete principal

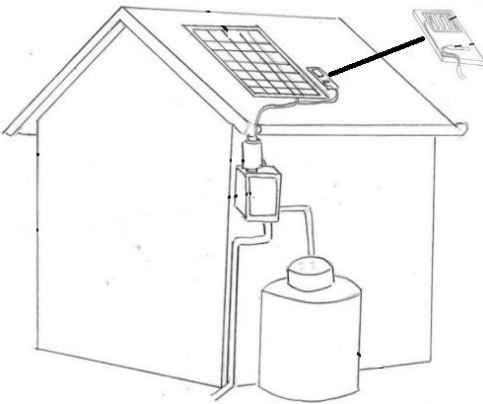


Fig. 5. Propuesta completa

V. ARQUITECTURA DEL SISTEMAS

La arquitectura del sistema autónomo de captación de agua pluvial está diseñada para operar de manera automática a través de una secuencia de módulos funcionales que coordinan el proceso completo de recolección, tratamiento y almacenamiento del agua, además de garantizar su control energético y operativo.

El ciclo inicia con la captación directa del agua de lluvia o granizo, que ingresa al sistema a través de un cilindro

recolector de acero inoxidable. En condiciones de baja temperatura, si se detecta probabilidad de granizo, el sistema activa un mecanismo de calefacción interna mediante resistencias calefactoras de acero inoxidable ubicadas en contacto directo con el agua recolectada. Estas resistencias se activan cuando el sensor de temperatura DS18B20 registra un valor igual o inferior a un umbral predefinido, permitiendo el derretimiento del granizo antes de continuar el flujo. Una vez derretido, el agua pasa por un filtro metálico que elimina impurezas físicas gruesas. Luego atraviesa el sensor de flujo YF-S201, el cual registra el caudal de agua en tiempo real y permite calcular el volumen procesado. Posteriormente, el líquido pasa por una electroválvula Burkert 0330/0331 (3/2 NC) controlada electrónicamente, y finalmente se dirige hacia el tanque de almacenamiento. El sensor de nivel DFRobot Gravity, ubicado en el interior del tanque, monitorea el volumen almacenado. Si el nivel supera el umbral establecido, se envía una señal al sistema de control para desactivar la electroválvula, redirigiendo el flujo hacia un canal de desfogue alternativo, evitando así el rebalse del sistema.

La unidad de control principal es una placa NodeMCU ESP8266 (ver fig. 6), encargada de leer los datos de los sensores, ejecutar la lógica de control y activar o desactivar los actuadores según las condiciones del entorno. Para ello, se utilizan elementos de adaptación como un módulo relé de un canal para accionar la electroválvula y una etapa de aislamiento con optoacoplador PC817, que permite adaptar señales de sensores como el Hydreon RG-9, el cual detecta la presencia de lluvia en la zona. El suministro de energía se realiza mediante un panel solar de 12 V, que alimenta una batería recargable de litio de 12 Ah, a través de un regulador de voltaje LM2596. Este bloque energético garantiza la autonomía completa del sistema y su funcionamiento continuo, incluso en ausencia de red eléctrica.

Finalmente, desde la unidad de control principal, envía todos los datos necesarios para mostrar al usuario, como la temperatura, caudal, estado de los sensores y el nivel del tanque, ofreciendo una herramienta centralizada de control remoto accesible desde cualquier dispositivo con conexión a internet. La secuencia funcional del sistema, junto con la interacción entre sus módulos físicos y electrónicos, se resume en la Figura 3, la cual presenta el diagrama de bloques general de la arquitectura.

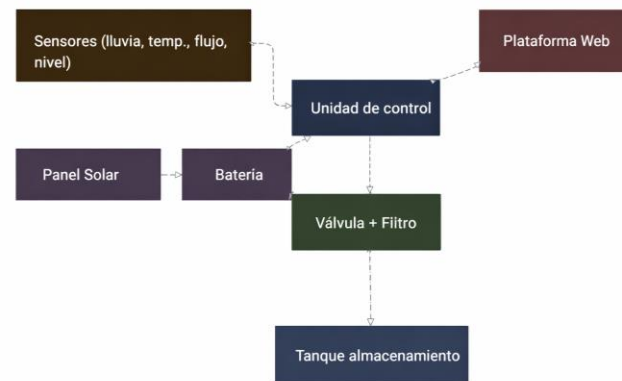


Figura 6: Diagrama de bloque

El sistema integra una interfaz intuitiva con indicadores visuales para monitorear su operación en tiempo real (ver fig.7). Mediante un código de colores, se distinguen tres estados clave: funcionamiento normal, carga energética y solicitud de mantenimiento. La plataforma muestra el porcentaje de energía solar generada, el nivel de la batería y el llenado del tanque (0–100%), permitiendo al usuario gestionar el consumo o activar desfogues preventivos. Además, registra datos críticos como la detección de lluvia/granizo (activando resistencias térmicas cuando es necesario), el flujo de agua (mediante pulsaciones por segundo) y el destino del caudal (tanque o vía alterna), con alertas visuales para anomalías. Incluye controles manuales para la válvula de salida, que opera en secuencia Cerrado → Bombeando → Abierto, garantizando un flujo seguro solo si el tanque supera el 40% de capacidad. Todo ello, bajo un interruptor maestro para alternar entre modos automático y manual, asegurando la protección de los componentes (ver fig.7).

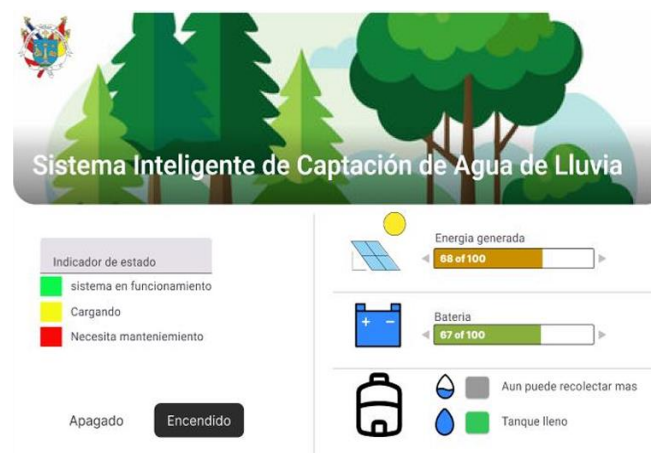


Figura 7: Interfaz del sistema

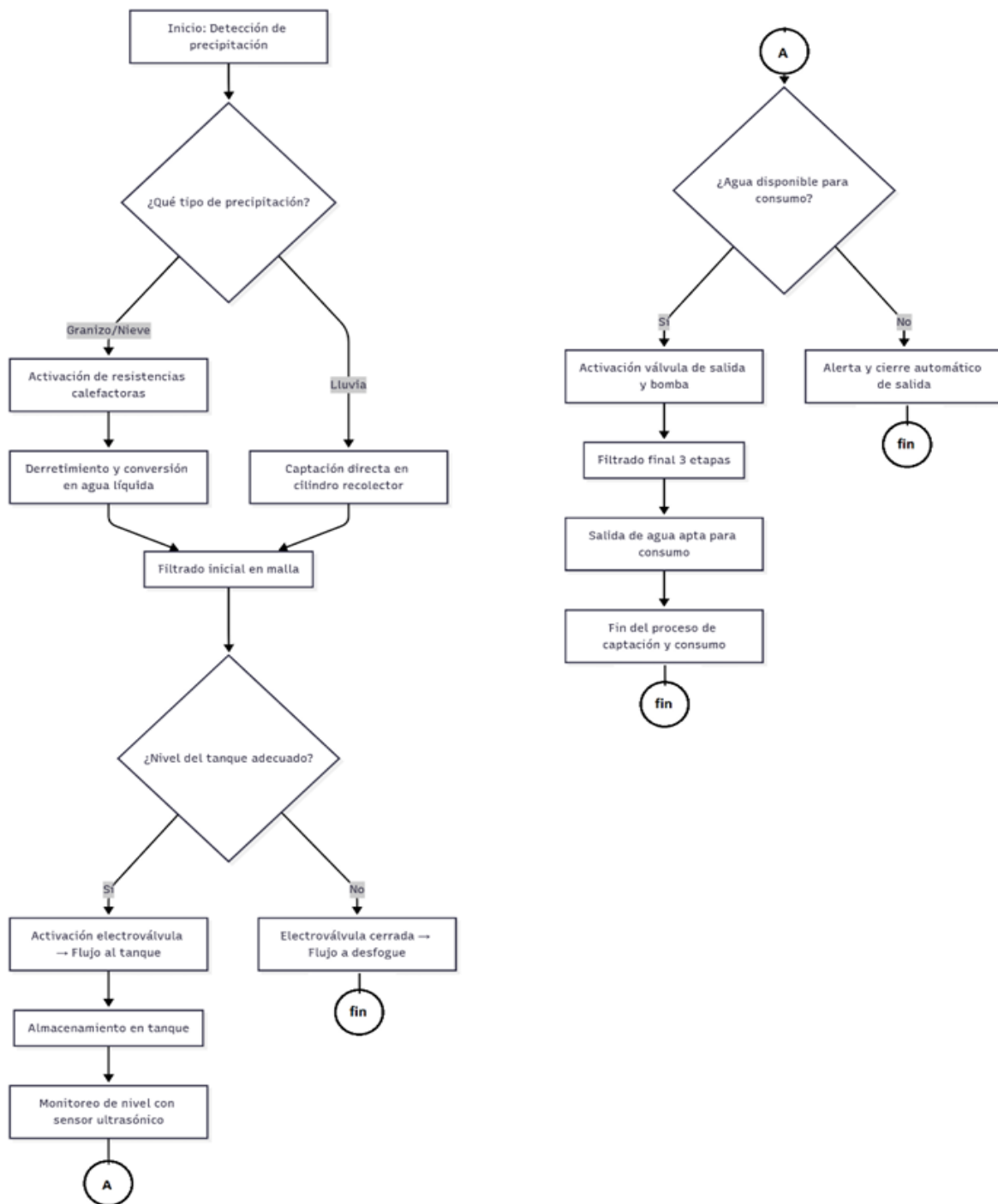


Fig. 8: Flugrama del funcionamiento

VII. RESULTADOS

Como parte de la validación social en el sur del Perú, el 76.5 % de los encuestados consideró la solución "innovadora y útil", y el 11.8 % fue neutral. Estos resultados muestran alta aceptación comunitaria y respaldan la viabilidad del proyecto, cuyos datos completos se analizarán en etapas posteriores (ver fig. 9).

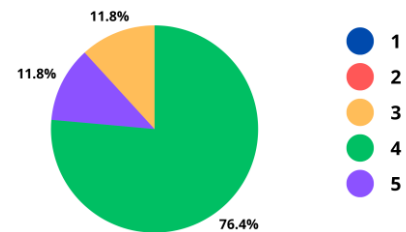


Fig. 9: Resultado de aceptación

Junto a los resultados previos, la encuesta reveló que el 45.8% de los usuarios consideró que el funcionamiento automático y con energía solar del sistema es "práctico y sostenible", mientras que un 28.1% lo valoró positivamente y un 26.1% se mantuvo neutral (ver fig. 10). Estos datos refuerzan la percepción favorable hacia soluciones autónomas y energéticamente eficientes, alineadas con las necesidades de comunidades con acceso limitado a recursos eléctricos e hídricos.

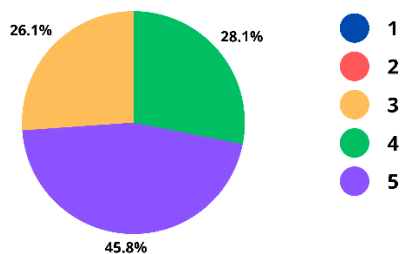


Fig. 10: Resultado de la encuesta de percepción.

VIII. DISCUSIÓN

El sistema autónomo de captación desarrollado busca resolver de forma integral un problema crítico en las zonas rurales del sur del Perú: la falta de acceso al agua potable en contextos de estrés hídrico severo. A diferencia de soluciones previas como la patente [12], que únicamente contempla la recolección de agua de lluvia, nuestro sistema incorpora además la capacidad de derretir y procesar granizo, lo cual amplía significativamente su utilidad en regiones de clima extremo [11]. Asimismo, frente a propuestas como la patente [23], centradas en entornos controlados como invernaderos, nuestra solución opera en espacios abiertos y de difícil acceso, sin depender de infraestructura complementaria [12].

Desde el punto de vista tecnológico, este proyecto marca una evolución respecto a sistemas pasivos como EKOMURO [5], al integrar sensores inteligentes y una lógica de control automatizada mediante la placa NodeMCU ESP8266. Esta decisión se basó en experiencias previas exitosas como las de Vimos y Sacoto [11], quienes demostraron la aplicabilidad del uso de microcontroladores en entornos urbanos. La elección de componentes como el sensor de flujo YF-S201 y el sensor de nivel DFRobot responde a la necesidad de medir en tiempo real el volumen recolectado y evitar el sobrellenado del tanque, funcionalidades ausentes en diseños más simples como los de Quintana [7].

Además, la plataforma digital de monitoreo desarrollada se sustenta en el uso de tecnologías abiertas como el protocolo MQTT [9] y la interfaz Home Assistant [25], permitiendo una visualización en tiempo real del estado del sistema, lo cual no se encuentra en la mayoría de los antecedentes revisados. En ese sentido, se alinean también con las recomendaciones de Tivani et al. [17] sobre la

enseñanza y aplicación de arquitectura IoT basada en sensores distribuidos y gestión remota.

En cuanto a la eficiencia energética, se utilizó un panel solar de 12 V con batería de litio recargable, garantizando autonomía y sostenibilidad. Este enfoque resulta coherente con experiencias como la de Esquicha-Tejada et al. [10], quienes integraron tecnologías fotovoltaicas e IoT para mejorar la gestión hídrica urbana. Por su parte, el uso de componentes de bajo consumo y módulos de control con protección eléctrica (como el relé SRD-05VDC y el optoacoplador PC817) permite mantener la seguridad del sistema sin elevar el costo total, el cual fue calculado en apenas 174.10 USD. Esto lo convierte en una opción viable frente a soluciones comerciales más costosas y menos adaptadas al contexto rural.

Finalmente, el sistema propuesto no solo aporta una solución técnica eficiente, sino que está validado por una encuesta aplicada a personas en la región sur del Perú, lo cual permitió adaptar el diseño a necesidades reales y maximizar su impacto potencial [3]. En ese sentido, se confirma que el enfoque adoptado responde tanto a criterios de innovación como de pertinencia social, proponiendo un modelo replicable para afrontar la crisis hídrica en territorios vulnerables [2].

IX. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

El desarrollo del sistema autónomo de captación de agua de lluvia y granizada representa una solución integral, eficiente y viable para contextos rurales con limitaciones hídricas severas. A través de la incorporación de sensores inteligentes, energía solar, automatización y una plataforma web de monitoreo, se logró superar las limitaciones técnicas y funcionales identificadas en sistemas tradicionales y antecedentes similares. Además, la capacidad de capturar y procesar no solo lluvia sino también granizo amplía su aplicabilidad en regiones de alta altitud o clima extremo, lo cual lo diferencia significativamente de otras propuestas tecnológicas ya documentadas. Este proyecto no solo se valida técnicamente, sino también socialmente, gracias al levantamiento de información con 68 habitantes de la región sur del Perú, cuyas necesidades y realidades guiaron el diseño final. La modularidad, bajo consumo energético, accesibilidad y facilidad de replicación convierten este sistema en una propuesta de gran potencial para su implementación masiva en zonas vulnerables. Asimismo, al integrar tecnologías abiertas y de bajo costo, se promueve el acceso a soluciones sostenibles, alineadas con los objetivos globales de desarrollo sostenible y resiliencia climática.

Con el sistema autónomo de captación de agua, es posible plantear un análisis de cada familia como un trabajo futuro que logre generar predicciones con el uso del aprendizaje automático [25] que permita mejorar el rendimiento del sistema autónomo en cada hogar.

RECONOCIMIENTO

Agradecemos profundamente a la Universidad Católica de Santa María (UCSM) por brindarnos el espacio académico, la orientación docente y los recursos tecnológicos que permitieron el desarrollo de este proyecto. Su apoyo institucional ha sido fundamental para consolidar una propuesta con impacto social y ambiental.

REFERENCIAS

- [1] United Nations, "Water – Global Issues," [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/en/global-issues/water>
- [2] CEPLAN, "Plan Nacional de Recursos Hídricos 2023–2040," [En línea]. Disponible en: <https://www.ceplan.gob.pe/documentos/plan-nacional-recursos-hidricos-2023-2040>
- [3] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), "Arequipa alberga a 1.3 millones de habitantes," [En línea]. Disponible en: <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/arequipa-alberga-a-1-millon-316-milhabitantes-9903>.
- [4] La República, "Alertan posible falta de agua en Arequipa," [En línea]. Disponible en: <https://larepublica.pe/sociedad/1303268-arequipa-alertan-posible-falta-agua>.
- [5] M. Ramírez-Mesa, "EKOMURO: Una iniciativa transformadora para la recolección de agua de lluvia en comunidades vulnerables de Colombia," Revista Ingeniería Ambiental, [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/66616>
- [6] F. Darío, "Rainwater System Proposal for Home Use," Tesis, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/1325/1/PropuestaSistemaAguaLluvia.pdf>
- [7] J. Quintana, "Sistema de Aprovechamiento de Agua de Lluvia para Viviendas," Tesis, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6216>
- [8] J. Esquicha-Tejada y J. Copa-Pineda, "Alternatives of IoT Irrigation Systems for the Gardens of Arequipa," Int. J. of Interactive Mobile Technologies (iJIM), vol.15, no. 22, pp. 79–94, 2021. doi: <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i22.22653>
- [9] S. Quincozes et al., "MQTT Protocol: Fundamentals and Security Mechanisms," IEEE Latin America Transactions, vol. 17, no. 3, pp. 430–437, 2019. doi:<https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8931137>
- [10] J. Esquicha-Tejada and J. Copa-Pineda, "Integration of an IoT system Photovoltaic system to optimize the consumption of drinking water in the irrigation of gardens in the City of Arequipa", in Proc. LACCEI Int. MultiConf. Eng., Educ. Technol., July 2020, pp. 27–31, doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.212.
- [11] V. Vimos y E. Sacoto, "Sensor Network Based on Arduino for Urban Infrastructure Monitoring," IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 5, pp. 1354–1361, 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8789574>
- [12] WO 2020 080923 A1, "Automatic Rainwater Collecting System," [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/WO2020080923A1>
- [13] CN 211982907 U, "Greenhouse for Rain & Snow Collection," [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/CN211982907U>
- [14] M. Marroquín y J. Trejo, "Hormigón Permeable para la Captación de Agua de Lluvia," Tesis, Universidad Central del Ecuador, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/20271>
- [1] Fundación Aquae, "Principales datos del agua en el mundo," [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/principales-datos-del-agua>
- [2] [15] M. B. I. Astutiningtyas y M. M. N. Suyoto, "Automatic Plants Watering System for Small Garden," iJIM, vol. 15, no. 2, pp. 40–52, 2021. doi: <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i02.12803>
- [3] A. T. Tivani et al., "Didactic Prototype for Teaching MQTT Protocol in Engineering Courses," IEEE Latin America Transactions, vol. 18, no. 4, pp. 589–596, 2020. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9085293>
- [4] T. A. Khoa et al., "Smart agriculture using IoT multi-sensors: A novel watering management system," J. Sens. Actuator Netw., vol. 8, no. 3, p. 45, 2019, doi: 10.3390/jsan8030045.
- [5] M. M. Islam, A. Rahaman, and M. R. Islam, "Development of smart healthcare monitoring system in IoT environment," SN Comput. Sci., vol. 1, no. 3, p. 185, 2020, doi: 10.1007/s42979-020-00195-y.
- [6] M. Naresh and P. Munaswamy, "Smart agriculture system using IoT technology," Int. J. Recent Technol. Eng., vol. 7, no. 5, pp. 98–102, 2019.
- [7] K. Saravanan, E. Anusuya, R. Kumar, and L. H. Son, "Real-time water quality monitoring using Internet of Things in SCADA," Environ. Monit. Assess., vol. 190, no. 9, p. 556, Sep. 2018, doi: 10.1007/s10661-018-6914-x.
- [8] A. J. Rau, J. Sankar, A. R. Mohan, D. Das Krishna, and J. Mathew, "IoT based smart irrigation system and nutrient detection with disease analysis," in Proc. IEEE Int. Symp. Technol. Smart Cities (TENSYP), 2017, art. no. 8070100, doi: 10.1109/TENCONSpring.2017.8070100.
- [9] M. Al-Kuwari et al., "Smart-home automation using IoT-based sensing and monitoring platform," in *Proc. IEEE 12th Int. Conf. Compat., Power Electron. Power Eng. (CPE-POWERENG)*, 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/CPE.2018.8372548.
- [10] J. Lin, C. Xie, W. Tan, and Z. Li, "Intelligent condensation irrigation system based on Internet of Things," in Proc. 5th Int. Conf. Intell. Control, Meas. Signal Process. (ICMSP), 2023, pp. 1065–1070, doi: 10.1109/ICMSP58539.2023.10170873.
- [11] Home Assistant, "Installing Home Assistant OS," [En línea]. Disponible en: <https://www.home-assistant.io/installation>
- [12] Eclipse Foundation, "Mosquitto Broker 2.0," [En línea]. Disponible en: <https://mosquitto.org>
- [13] P. Mathivanan et al., "Smart Mirror Home Automation," en Proc. IEEE Int. Conf. Smart Systems and Advanced Computing (ICSCAN), 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/ICSCAN.2019.8878799>
- [14] M. V. Moise et al., "Deploying Online vs Offline IoT Architectures," en Proc. IEEE Int. Symp. on Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/SIITME.2018.8599279>
- [15] A. Apaza-Pinto, J. Esquicha-Tejada, P. Lopez-Casaperaalta, and J. SullaTorres, "Supervised Machine Learning Techniques for the Prediction of the State of Charge of Batteries in Photovoltaic Systems in the Mining Sector," IEEE Access, vol. 10, pp. 134307–134317, 2022, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3225406.