

Design of a Climate-Responsive Photovoltaic Pumping and Irrigation System to Enhance Economic and Food Stability in Peru

Castillo Fernandez Jorge Alonso¹; Carlos Alexis Alvarado-Silva²

^{1,2}Grupo de Investigación “Fabricación Digital e Innovación Educativa”, Universidad César Vallejo, Perú,
j0rgecastillofernandez2003@gmail.com, calvarados@ucv.edu.pe

This research proposes the design of a climate-adaptive photovoltaic pumping and irrigation system (PV-PIS) for a 7-hectare sugarcane plot in Chimbote, Ancash, aiming to improve water and energy efficiency within the Peruvian agricultural context. The study addresses the sector's high-water demand, dependence on fossil fuels, and increasing climate uncertainty. The methodology followed an applied and quantitative approach with a descriptive-propositional design. Historical meteorological data from NASA Power and SENAMHI were used to determine the crop's water requirement, estimated at 370.3 m³ per day, as well as the optimal solar resource availability. Based on these parameters, a 7.06 kWp photovoltaic system composed of thirteen 575 W monocrystalline panels was dimensioned, managed by an 8 kW hybrid inverter and integrated with an automation system using a Siemens S7-1200 PLC and environmental sensors. Technical validation was performed through SISIFO software simulation, yielding an estimated annual energy generation of 12,217 kWh. The economic analysis determined an initial investment of S/. 56,586.09, a levelized cost of energy (LCOE) of S/. 0.781/kWh, a positive Net Present Value (NPV) of S/. 7,955.03, and an Internal Rate of Return (IRR) of 12.00%, with a payback period of 7.46 years. The results confirm that the proposal is technically and financially viable, representing a sustainable alternative to conventional irrigation systems.

Keywords: Design, pumping system, photovoltaic, agricultural irrigation, economic evaluation.

Diseño de un sistema de bombeo y riego fotovoltaico con adaptabilidad climática para la estabilidad económica y alimentaria en el Perú

Castillo Fernandez Jorge Alonso ¹; Carlos Alexis Alvarado-Silva²

^{1,2}Grupo de Investigación “Fabricación Digital e Innovación Educativa”, Universidad César Vallejo, Perú,
jorgecastillofernandez2003@gmail.com, calvarados@ucv.edu.pe

La presente investigación propone el diseño de un sistema de bombeo y riego fotovoltaico (SBPF) con adaptabilidad climática para una parcela de 7 hectáreas de caña de azúcar en Chimbote, Ancash, con el objetivo de mejorar la eficiencia hídrica y energética en el contexto agrícola peruano. El estudio responde a la alta demanda de agua del sector, la dependencia de combustibles fósiles y la creciente incertidumbre climática. La metodología empleada fue de enfoque aplicado y cuantitativo, con diseño descriptivo-propositivo. Se utilizaron datos meteorológicos históricos de NASA Power y SENAMHI para determinar el requerimiento hídrico del cultivo, estimado en 370.3 m³ diarios, y la disponibilidad solar óptima. Con base en estos parámetros, se dimensionó un sistema fotovoltaico de 7.06 kWp compuesto por 13 paneles monocristalinos de 575 W, gestionado por un inversor híbrido de 8 kW e integrado a un sistema de automatización mediante PLC Siemens S7-1200 y sensores ambientales. La validación técnica se realizó mediante simulación en el software SISIFO, obteniendo una generación estimada de 12,217 kWh/año. El análisis económico determinó una inversión inicial de S/. 56,586.09, un costo nivelado de energía (LCOE) de S/. 0.781/kWh, un VAN positivo de S/. 7,955.03 y una TIR de 12.00%, con un periodo de recuperación de 7.46 años. Se concluye que la propuesta es técnica y financieramente viable, constituyendo una alternativa sostenible frente a sistemas de riego convencionales.

Palabras clave: Diseño, sistema de bombeo, fotovoltaico, riego agrícola, evaluación económica.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura se considera una actividad vital para la estabilidad económica y la seguridad alimentaria del Perú. Sin embargo, dada la geografía, centralismo y general disposición de los recursos y servicios, muchas zonas del país poseen retos y obstáculos que hacen más costoso el proceso de lo que potencialmente podría ser. Ante esta situación, el uso de sistemas de bombeo que funcionan con energía solar fotovoltaica parece una solución prometedora. Estos sistemas buscan maximizar la productividad agrícola aprovechando la abundante radiación solar presente en muchas zonas del país, a la vez que promueven la sostenibilidad ambiental y económica de las plantas agrícolas.

Varias investigaciones confirmaron el potencial de los sistemas de bombeo con energía solar fotovoltaica (SBPF) para aumentar la productividad de campo y mejorar las condiciones de vida de los agricultores. Por ejemplo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) indicó en 2011 que la tecnología fotovoltaica representa una oportunidad viable y sostenible

para fortalecer el sector hídrico en países en desarrollo con alta insolación [1] [2]. De manera similar, estudios realizados en América Latina por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) demostraron la rentabilidad y los beneficios ambientales de implementar estos sistemas en diferentes cultivos. Finalmente queda claro que el optar por tecnologías sostenibles y eficientes se convierte en una necesidad imperiosa para asegurar la productividad agrícola a largo plazo cuando tenemos en cuenta varios factores que influyen en la demanda y eficacia requerida para la industria. [3] [26]

En Perú, la agricultura es muy importante para la economía y es una gran fuente de trabajo y dinero. Esto se ve especialmente en Ancash, donde el trabajo en el campo es fundamental para muchas familias. Sin embargo, muchos agricultores enfrentan problemas para conseguir energía confiable para el riego. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura destaca la complicada conexión entre la agricultura y el cambio climático, reconociendo que este sector es vulnerable tanto a los efectos del clima como a sus propias contribuciones al problema.

Atendiendo a esta idea, el estudio que se presenta parte de constatar que, hoy en día, gran cantidad de productores agrícolas de la región emplean métodos de irrigación que demandan un gasto importante de energía, por lo general obtenida de recursos caros y no renovables, tales como los carburantes fósiles. Esto no solo ocasiona gastos de funcionamiento elevados que impactan las ganancias de sus sembradíos, sino que también agrava las dificultades del calentamiento global al liberar gases de efecto invernadero. Aparte, la variación en los valores de los combustibles fósiles agrega una porción de duda económica que dificulta la organización a largo plazo para los campesinos. La existencia limitada o la falta de acceso a energía segura incluso pueden impedir la extensión de los terrenos de labranza y la variación de artículos, limitando el posible desarrollo del ámbito agrario regional.

El objetivo general de la presente investigación se define como dimensionar y proponer una iniciativa de innovación en sistemas de generación fotovoltaica orientada al uso agrícola en sistemas de irrigación automatizados, buscando optimizar la eficiencia hídrica y energética en la zona de estudio. [18]

Para dar cumplimiento a esta meta principal, se establecen los objetivos específicos que estructuran el desarrollo lógico

del proyecto. En una primera instancia, se determinará el requerimiento hídrico del cultivo seleccionado para establecer la demanda base, a la par que se evaluará el recurso energético disponible mediante el análisis de la irradiancia solar local. Basado en estos parámetros físicos y ambientales, se procederá a seleccionar y dimensionar los componentes técnicos del sistema integral. Finalmente, se ejecutará una evaluación económica exhaustiva con el fin de demostrar la viabilidad financiera y la sostenibilidad de la solución propuesta frente a los métodos convencionales. [19] [28]

Sin embargo, en un escenario de creciente incertidumbre climática, el diseño no puede limitarse a una operación estática que simplemente se riega con un horario predefinido o programable. Es aquí donde el concepto de adaptabilidad climática y estacional se convierte en el pilar fundamental de esta propuesta. El cambio climático no solo implica un aumento gradual de las temperaturas, sino también una intensificación de los fenómenos meteorológicos extremos, como sequías más prolongadas, olas de calor más severas y, paradójicamente, precipitaciones irregulares y a menudo torrenciales. Un sistema de riego convencional, incluso si es fotovoltaico, no está concebido para responder a esta volatilidad en el clima, lo que puede llevar a un uso ineficiente del recurso hídrico y energético. [10]

Para hacer frente a esta variabilidad, se propone la idea de una capa de inteligencia y automatización. Esto se logrará mediante la integración de una red de sensores clave cuyos datos serán procesados en tiempo real por un controlador central. Este controlador, basado en algoritmos predefinidos, ajustará dinámicamente el régimen de bombeo y riego. Por ejemplo, en épocas de sequía y alta radiación solar, el sistema priorizará el bombeo para satisfacer la máxima evapotranspiración del cultivo y evitar el estrés hídrico. Por el contrario, ante la detección de humedad suficiente en el suelo, durante periodos de baja demanda hídrica por frío o en temporada de lluvias, el sistema reducirá o incluso detendrá su funcionamiento, conservando así el agua en su fuente y evitando problemas como la saturación del suelo y la lixiviación de nutrientes. [6]

II. METODOLOGÍA

El alcance de la investigación se limitó geográficamente al área de Chimbote en el área de Ancash con respecto a las condiciones climáticas específicas de la zona costera peruana. El estudio incluyó el análisis histórico de los datos meteorológicos en los últimos diez años para garantizar la representatividad de los resultados. El diseño propuesto se centró en los cultivos representativos en esta área y preferirá aquellos que tienen una mayor importancia económica y social para los agricultores locales, ultimadamente, se determinó que el cultivo con el cual se realizó la proyección, cálculos y análisis fue la caña de azúcar.

Se utilizaron múltiples técnicas y herramientas externas para recopilar datos. La técnica de análisis documental recopiló información sobre la luz solar a través de bases de datos meteorológicas oficiales de Senamhi y fuentes internacionales como la NASA Power [3, 4]. Los certificados

de registro estandarizados se utilizarán para sistematizar datos históricos sobre radiación, temperatura, humedad relativa y precipitación.

El análisis económico se basó en métodos de evaluación de proyectos, calculando indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión (PRI) [5] [23]. Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los resultados ante variaciones en parámetros críticos como costos de equipos, tasas de descuento y precios de energía convencional. [6] [24] [25]

III. RESULTADOS

La investigación y aplicación de la metodología empezó determinando de forma concreta la ubicación del proyecto, en este caso, se ha seleccionado un área agrícola de 7 (6.99) Hectáreas a la orilla del Río Santa en el departamento de Ancash. [20]

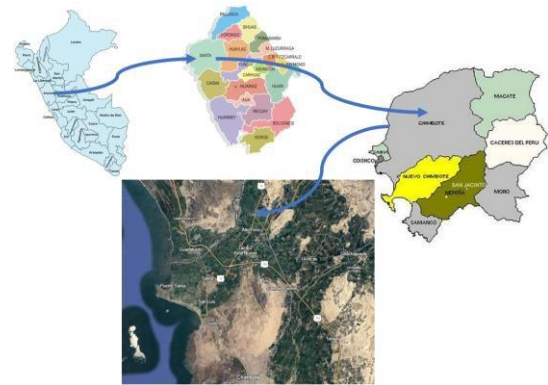


Figura 1. Ubicación del Proyecto

El área a considerar consta de una porción de terreno agrícola de aproximadamente 1225.15 m de perímetro y unos 69895.69 m² de área, o 6.99 hectáreas a orillas del río Santa.

El terreno posee una elevación mínima de 61.55 msnm, una mediana de 64.04 msnm y una elevación máxima de 66.7 msnm.

De esta área, se asumió el uso de las 6.99 hectáreas para la plantación de caña de azúcar durante todo el año, puesto que, al tratarse de un cultivo capaz de crecer durante la totalidad del año, la implementación de adaptabilidad climática se aprovecha al máximo, además, la caña de azúcar es uno de los principales productos producidos en la región, por lo que agilizará el retorno de la inversión en el sistema.

Una vez definido el tipo de cultivo y el tamaño del terreno, en este caso, siete hectáreas de Caña de azúcar, se estimó la demanda hídrica, el consumo energético diario y se seleccionaron tanto la bomba de agua como el inversor más adecuado.

Con base en el consumo diario de energía y la radiación solar disponible, se determinó el número necesario de paneles solares (configurados en serie o paralelo) y la potencia pico requerida del sistema fotovoltaico. Finalmente, se calcularon los parámetros de producción energética del sistema completo.

Se utilizó la herramienta de software especializada CROPWAT para determinar el requerimiento hídrico del cultivo teniendo en cuenta la data climática obtenida de los portales climatológicos, bases de datos especializadas para los requerimientos específicos de la caña de azúcar y datos generalistas de la calidad y composición del suelo de la zona del proyecto.

Country	Peru		Station	Spring	
Altitude	61	m.	Latitude	8.91	°S
			Longitude	78.53	°W
Month	Min Temp	Max Temp	Humidity	Wind	Sun
	°C	°C	%	km/day	hours
January	21.3	27.3	86	357	12.5
February	22.0	29.0	84	323	12.4
March	21.2	27.2	84	322	12.2
April	19.0	25.4	85	315	11.9
May	16.4	23.6	88	396	11.6
June	16.6	22.0	88	351	11.5
July	15.6	21.7	88	403	11.5
August	15.3	21.1	88	384	11.7
September	14.9	22.1	89	367	12.0
October	15.8	22.4	86	349	12.2
November	16.8	23.2	86	300	12.4
December	18.1	23.3	88	311	12.5
Average	17.8	24.0	87	348	12.0
					Rad
					MJ/m ² /day
					mm/day
					ETo
					mm/day
					29.5
					5.05
					29.5
					5.52
					28.5
					5.13
					26.2
					4.40
					23.6
					3.50
					22.3
					3.14
					22.8
					3.14
					24.9
					3.36
					27.4
					3.75
					28.8
					4.19
					29.2
					4.43
					29.2
					4.35

Figura I. Resultados Clima y ETo en CROPWAT

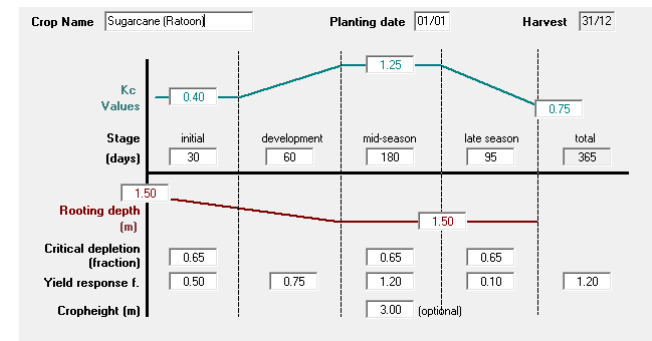


Figura 3. Datos del cultivo de la base de datos CROPWAT

TABLA I
Requerimiento Hídrico por Etapa en un ciclo idílico de 12 meses

Etapas	Meses Abarcado (Aprox.)	Duración (Días)	ETc Total de la Etapa (mm)	ETc Diario (mm/día)	Requerimiento Diario Promedio (Litros/m2/día)
Etapas Inicial	Ene (Dec. 1)	30	66.8	2.23	2.23
Etapas de Desarrollo (Development)	Ene (Dec. 2) a Mar (Dec 3)	60	288.7	4.81	4.81
Media Temporada (Mid-Season)	Abr (Dec 1) a Sep (Dec 3)	180	794.6	4.41	4.41
Final de Temporada (Late Season)	Oct (Dec 1) a Dic (Dec 3)	95	374	3.94	3.94
Total del Ciclo	Enero a Diciembre	365	1524.1	4.18	4.18

El requerimiento hídrico de la caña de azúcar se calcula a partir de la columna ETc (mm/día) de la tabla que nos proporciona CROPWAT, Este valor representa la Evapotranspiración del Cultivo, que es la cantidad de agua que

el cultivo consume a lo largo de su desarrollo y es el principal indicador de la necesidad neta de agua [9] [27].

Con esto se obtuvo que, como máximo, el cultivo de la caña de azúcar en las condiciones climáticas de la zona proyectada es de 4.81 Litros por metro cuadrado al día, antes de determinar cuánto sería el requerimiento en la totalidad de la zona proyectada, Ruth ortega Rey describe en sus investigaciones que es prudente aplicar un factor de corrección del 10% al requerimiento hídrico [7].

Usando las coordenadas del proyecto (8.91 Latitud, Sur; 78.53 Longitud, Oeste), fue posible consultar los datos de irradiación solar a distintos ángulos de inclinación. Este trabajo cuenta con datos consultados (Durante Agosto, 2025) y resultado de promediar data recopilada desde el enero del 2001 hasta el diciembre del 2020 [12].

TABLA II
Energía Solar anual con un ángulo de inclinación Optimo cada mes.

MES	Nºdías	Horizontal (0°) [kWh/(m²/día)]	Optimo cada mes [kWh/(m²/día)]
Enero	31	5,45	5,59
Febrero	28	5,10	5,12
Marzo	31	4,97	4,98
Abril	30	5,28	5,49
Mayo	31	5,09	5,67
Junio	30	4,78	5,61
Julio	31	4,95	5,71
Agosto	31	5,36	5,76
Septiembre	30	5,60	5,67
Octubre	31	5,83	5,83
Noviembre	30	5,92	6,05
Diciembre	31	5,50	5,69
Promedio		5,32	5,60
Energía Total [kWh/(m²/Año)]		1941	2043

Con el requerimiento Hídrico del área del cultivo y el recurso solar disponible en la región, tomando como datos los obtenidos cuando los paneles solares se encuentran en el ángulo más óptimo de captación solar cada mes, fue posible calcular y determinar los parámetros de diseño de la bomba y el sistema de irrigación.

Se determinó que el sistema de irrigación requiere un volumen por riego de 370.3 m³. Este volumen primero es captado del rio durante los intervalos entre riego (de 13 a 10 días dependiendo de la etapa de desarrollo del cultivo), mientras que una bomba de refuerzo se encarga de que la presión y caudal de irrigación en un sistema de tuberías ventana se mantenga constante y capaz de completar las 7 hectáreas de irrigación. [7]

TABLA III
Datos de diseño de las bombas de captación e irrigación (refuerzo)

Parámetro	Bomba de Captación (Río al Tanque)	Bomba de Refuerzo (Tanque al Riego)
Caudal de Diseño (Q)	3.93 m ³ /h	46.29 m ³ /h
Altura Total Equivalente (H _{TE})	6.27 m	5.5 m
Potencia Eléctrica Requerida (P _{elec})	0.134 kW	0.99 kW
Operación	10 días×12 h/día (1.608 kW/día)	1 día×8 h/día (7.92 kW/día)
Función	Garantizar el almacenamiento	Garantizar el caudal y presión de riego

Para la selección de componentes y el diseño del resto del sistema, se tomaron como datos de diseño los del mes menos favorable en el año con respecto a la disponibilidad del recurso energético con la intención de asegurar que el sistema funcione correctamente aun en los meses de escasez energética, se determino que el mes menos favorable es febrero con un ángulo de inclinación en los paneles fotovoltaicos de 5° hacia el norte, y una demanda energética de 7.92kW/h al día, ya que es la máxima carga presente en el sistema en algún punto de la operación. [5]

Para la bomba de captación y llenado del tanque, se determinó según los cálculos realizados que debe cumplir con un mínimo de 1.02 L/s de caudal (61.8 L/m) y una potencia disponible de 0.134 kW, se optó por seleccionar una bomba Pedrollo CP 600. Por otra parte, la bomba de refuerzo para la irrigación termino con un caudal pico de 78.5 m³/h (1300 L/min) usando aproximadamente 5.5kW. teniendo en cuenta estos parámetros, se determinó usar una bomba de la misma marca, Pedrollo en un modelo de mayor capacidad, en este caso la Pedrollo F 65/125B-I.

Teniendo en cuenta nuestras cargas principales como la carga de cada bomba hidráulica obtenemos una carga neta de: 5.5 kW + 0.37 kW = 5.87 kW. Luego, considerando un factor de seguridad del 20%, se obtuvo con la necesidad de un inversor capaz de soportar unos 7.1 kW aproximadamente, dado que se trata de un sistema fotovoltaico y automatizado, este se proyectó conectado a la red Nacional de energía con el fin de tomar energía cuando factores climáticos hagan que el sistema no pueda producir su máximo o lo necesario, mientras que al mismo tiempo el sistema fotovoltaico aportaría a la red nacional el resto del tiempo, cuando genera más energía de la que necesita. Finalmente se terminó por seleccionar un inversor híbrido Deye SUN-8K-SG04LP3-EU Que cuenta con un rango de voltaje de entrada de 200-650v y una salida configurable según especificación de 220/380v y 230/400v. Para esta proyección se trabajó con la proyección de una salida de 380v trifásico.

Se han seleccionado los Paneles de tipo mono facial Jinko Solar Tiger Neo N-type 575W (Modelo: JKM575N-72HL4). Cada panel tiene un output máximo de potencia de 575W, por lo tanto, es necesario tener aproximadamente unos 13 paneles en serie para entregar un total de 7.47kW de potencia a una corriente de 13.62A y una corriente de corto circuito de 14.39A.

Inicialmente, se consideró la necesidad de proveer al sistema de una fuente de poder ininterrumpida (UPS) para asegurarse que el sistema pueda proporcionar la potencia eléctrica requerida cuando las condiciones climáticas son desfavorables, esto entrando en parde de la automatización del sistema, sin embargo, al optarse por usar un inversor híbrido, la presencia de un UPS sería redundante, puesto que ya que el inversor híbrido seleccionado funciona como un UPS industrial por diseño, necesitando solamente que se le conecten baterías. Los inversores Híbridos de la marca Deye seleccionada tienen una compatibilidad nativa con baterías tipo LiFePO₄, y la misma compañía provee baterías especiales que interactúan con la tecnología BMS inteligente nativa de sus inversores, en este caso específico que opto por seleccionar baterías del modelo Deye SE-G5.1 Pro (Batería de Litio 48V).

El sistema de adaptación propuesto al inicio de esta investigación tiene como objetivo permitir que el sistema optimice el uso de recursos dependiendo de las condiciones climáticas y la época del año. Los principales componentes que juegan un papel importante en la automatización del sistema son un módulo PLC como la fuente de procesamiento principal, y la interfaz de usuario HMI que permite control manual, o seleccionar un control automatizado del sistema, así como proveer feedback al usuario de data relevante durante el funcionamiento del sistema en cualquiera de sus etapas. [15] [16] [17].

El proceso propuesto inicia con el sistema empezando a operar energizado por los paneles solares, complementando o respaldándose con la red nacional si la energía solar es insuficiente, esto es una función intrínseca del inversor híbrido y la razón por la cual se seleccionó en este trabajo. El PLC se enciende y establece comunicación con la HMI (Interfaz de Usuario) y el Inversor Híbrido. El sistema comienza a operar energizado por los paneles solares, complementando o respaldándose con la red nacional si la energía solar es insuficiente.

Ajuste de Inclinación Solar:

- El sistema lee el Mes Actual o la selección manual del usuario en la HMI.
- Compara el Ángulo Actual de los paneles (leído por un inclinómetro) con el Ángulo Objetivo (preset para ese mes).
- Los pistones se activan para mover el panel hasta que $\theta_{\text{actual}} = \theta_{\text{objetivo}}$. Este ángulo permanece fijo hasta el próximo cambio de mes o intervención manual.

Proceso de Llenado del Tanque: Este proceso es una rutina de fondo que opera continuamente para asegurar que el agua esté lista para el día de riego.

Monitoreo Ambiental (Exclusión):

- Lógica de Bloqueo: Si se detecta Lluvia Torrencial (riesgo de inundación), se bloquea inmediatamente el encendido de la Bomba de captación e irrigación hasta que las condiciones climáticas regresen a la normalidad.

Verificación de Nivel:

- El PLC lee el nivel del tanque a través del sensor hidrostático.
- Lógica de Activación: Si el nivel es menor al 85% Y no hay bloqueo por lluvia torrencial, se activa la Bomba A para captar agua del río.
- Lógica de Desactivación: La Bomba A permanece activa hasta que el nivel alcanza o supera el 85%.

Proceso de Riego Inteligente (Bomba de irrigación):

Esta es la rutina central que se ejecuta según un temporizador de días y se corrige con la información climática.

Día de Riego (Temporizador):

- El PLC verifica el contador de días desde el último riego.
- El sistema usa el preset del cultivo (11 días para Crecimiento Normal o 13 días para Germinación) como umbral.
- Cuando el contador alcanza el umbral (día 11 o 13), se inicia la fase de cálculo de riego.

Corrección Climática (Ajuste del Tiempo de Riego):

- Corrección por Temperatura: Si la Temperatura Actual es mayor al Promedio Mensual Programado, el tiempo base de riego (8 horas) se incrementa proporcionalmente, con un límite máximo del 10%.
- Corrección por Lluvia (Atenuación/Cancelación): Si se detecta Lluvia Torrencial (Lluvia alta), la operación se cancela totalmente, la Bomba de irrigación se mantiene apagada, y se envía una alerta de riesgo de inundación al usuario.
- Si se detecta Lluvia Moderada/Leve (Lluvia baja), el tiempo de riego se reduce (50% o 15% respectivamente).
- Cálculo Final: El tiempo de riego definitivo (t_{final}) es el resultado de aplicar la corrección por temperatura al tiempo base, y luego aplicar la atenuación por lluvia (si corresponde).

Si el riego no fue cancelado, el sistema activa la Bomba B durante el t_{final} calculado. Una vez finalizado, se apaga la Bomba de irrigación, el protocolo de llenado se vuelve a iniciar y el contador de días se resetea a cero, reiniciando el ciclo de espera para el próximo riego.

Se determinó usar el modelo Siemens S7-1200 (CPU 1214C) como PLC central en el dimensionamiento del sistema. Es el estándar industrial, soporta entradas analógicas para los sensores y tiene reloj de tiempo real (RTC) para el calendario de irrigación. A su vez, se escogió la interfaz HMI Siemens KTP700 Basic ya que integra nativamente con el PLC.

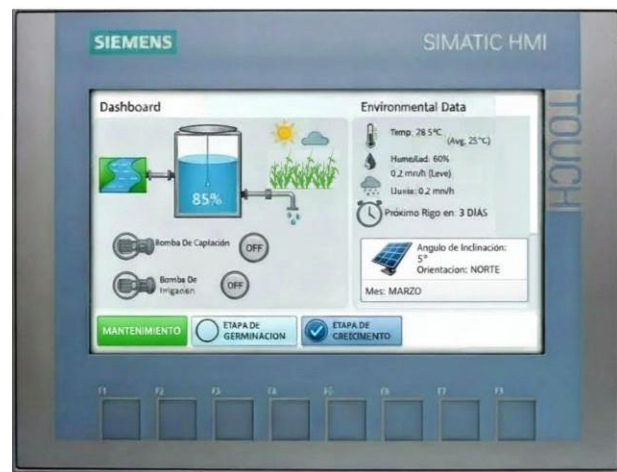


Figura 4. Propuesta Conceptual de la distribución y presentación de la interfaz de usuario maquina (HMI) seleccionada

La interfaz HMI recibirá data de una disposición variada de sensores con el objetivo de proporcionar una lectura legible para el usuario y una retroalimentación para la lógica del sistema.

Para llevar un control y lectura de la condición de llenado del tanque se seleccionó una sonda hidrostática Waterpilot FMX21 (Endress + Hauser), esta se sumerge en el fondo y da una señal de 4-20mA proporcional a la altura del agua que es leída y reinterpretada por el controlador PLC.

Luego se seleccionó el pluviómetro de la marca Davis Instruments Rain Collector (7852) de tipo cazoleta basculante. Este envía pulsos al PLC por cada 0.2mm de lluvia, Estos datos se envían al PLC, el cual calculará la intensidad de lluvia en mm/hora.

Para la lectura de tanto temperatura como humedad ambiental se seleccionó el sensor industrial de la marca Vaisala HMP60, este cuenta con una salida analógica que permite la conexión al PLC. Por otra parte, el Inclínómetro que se encargará de leer la inclinación de los paneles sería un sensor de la marca Turck B2N45H con el cual el PLC podrá determinar el cómo activar los actuadores encargados de la inclinación de los paneles solares.

Los actuadores principales del sistema de automatización serían los pistones lineales que se encargaran de regular la inclinación de los paneles solares, en este caso, un par de Actuadores lineales de 12V/24V DC con de la marca Progressive Automations (PA-09-2-330-N-24VDC), y dos contactores Schneider Electric TeSys K/D (LC1D18BD) para servir como controladores de las bombas de irrigación y captación, uno de una capacidad de 9 Amperios para la bomba de captación y otro de 18 amperios para la bomba de irrigación.

Posterior a la selección de los componentes principales, se procedió a seleccionar componentes de protección dependiendo de las distintas cargas y demandas eléctricas en distintas partes del sistema.

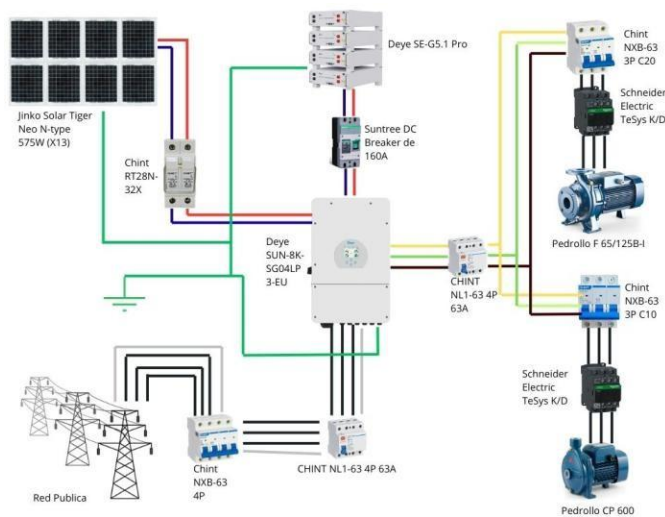


Figura 5. Propuesta conceptual simplificada de la distribución del sistema electro mecánico final

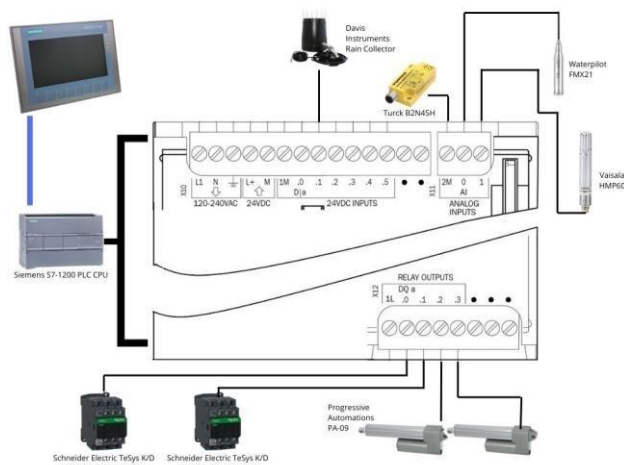


Figura 6. Propuesta conceptual simplificada de la distribución del sistema de automatización final

Para demostrar la eficiencia a largo plazo del sistema, se usó la herramienta de libre acceso SISIFO, un simulador especializado en sistemas de bombeo fotovoltaico. En la simulación se utilizó datos obtenidos en los cálculos teóricos anteriores:

- Latitud: -8.91
- Longitud: -78.53
- Orientación e inclinación: 5°
- Potencia de diseño o potencia total del sistema: 7.06 kWp
- Altura manométrica: 64 m
- Caudal: 46.29 m³/h
- Módulos fotovoltaicos en serie: 13
- Módulos fotovoltaicos en paralelo :0

El sistema de SISIFO ofrece la flexibilidad de elegir la naturaleza de la información que se usara en la simulación. Una de las opciones de datos meteorológicos más comunes y eficientes para un análisis preliminar son los promedios

mensuales. Este fue el formato con el que se trabajó para realizar la simulación. Para llevar a cabo el ejercicio de simulación, se utilizó la información de irradiación que el propio programa SISIFO descarga de PVGIS. El propósito de esto fue poder contrastar su resultado con los cálculos teóricos que se realizaron previamente, los cuales se apoyaron en la data proporcionada por el portal NASA Power. [21] [22]

Los principales resultados de interés de la simulación que se obtuvieron, es la producción media de energía en KWh/KWp, así como la producción del bombeo diario en m³/h.

TABLA IV
Resultados de la simulación en SISIFO

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Volumen [m ³ /kWp]	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64
Energía CA en el motor [kWh/kWp]	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
Energía mecánica en la salida del motor [kWh/kWp]	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
Energía Hidráulica [kWh/kWp]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

También, se obtuvo el reporte de una proyección en las pérdidas anuales de energía en el sistema simulado.

TABLA V
Proyección de pérdidas energéticas anuales

Parámetro	Valor anual
energía útil [%]	-0,45
suciedad e incidencia [%]	5,56
por sombreado [%]	16,46
potencia de entrada del inversor [%]	6
temperatura de la célula [%]	3,68
baja irradiancia [%]	0
Cableado CC [%]	0,49
Inversor CC/CA [%]	65,16
Cableado de BT [%]	3
Motor [%]	16,97
Bomba [%]	32,55

La evaluación de la viabilidad económica del proyecto se comenzó determinando la inversión inicial o presupuesto necesario, considerando no solo el costo de adquisición de los componentes principales (paneles solares, bomba, inversor, estructura y cableado), sino también los gastos asociados a la instalación, mantenimiento, etc.

TABLA VI
Inversión final del proyecto

Concepto	Monto (S/.)
A. Subtotal de equipos y materiales	47,155.08
B. Total mano de obra (instalación)	8,487.91
C. Mantenimiento proyectado (1er año)	943.1
Gran Total de Inversión (A + B)	55,642.99
Gran Total Proyectado (A + B + C)	56,586.09

Se determinó una inversión, presupuesto o capital inicial proyectado de S/.56586.09, sin embargo, el sistema también debe proyectar los gastos anuales por mantenimiento. [29]

TABLA VII
Proyección del costo anual del sistema

Componente	Descripción de la Tarea Anual	Costo Anual Estimado (S/)
Panel Fotovoltaico (13 unidades) e Inversor Híbrido (1 unidad)	Mantenimiento Preventivo del Sistema FV Completo: Limpieza de paneles, inspección visual y termográfica, revisión del rendimiento y estado del inversor.	S/ 1,200.00
Bomba de Captación (Pedrollo CP 600)	Mantenimiento Preventivo Anual por Unidad: Incluye revisión, cambio de sello mecánico, cambio de rodamientos y limpieza de impulsor.	S/ 380.00
Bomba de Irrigación (Pedrollo F 65/125B-I)	Mantenimiento Preventivo Anual por Unidad: Incluye revisión, cambio de sello mecánico, cambio de rodamientos y limpieza de impulsor.	S/ 380.00
Costo Total Estimado Anual	(Mantenimiento del Sistema FV + 2 Bombas)	S/ 1,960.00

La producción de energía del sistema fotovoltaico es de 12,217 kWh/año, parámetro establecido con los cálculos justificados referentes al parámetro en cuestión en el trabajo completo de este proyecto, el cargo por operación y mantenimiento del sistema de bombeo fotovoltaico es de S/. 1,960.00 anuales.

Por otra parte, se asume el descuento para la evaluación económica del proyecto con un interés para el VAN del 10%, y un LCOE constante durante el período de evaluación, la vida útil 20 años.

La evaluación económica del sistema fotovoltaico se guio por el análisis del Costo Nivelado de Energía Eléctrica (LCOE), calculado en S/. 0.781/kWh al considerar una tasa de descuento del 12% a lo largo de los 20 años de vida útil del proyecto. Este valor establece el costo mínimo al que debe valorarse la energía producida para cubrir todos los gastos de inversión inicial (S/. 56,586.09) y de operación y mantenimiento (S/. 1,960.00 anuales). Posteriormente, para la evaluación de la rentabilidad, se empleó un interés para el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) del 10%. Al valorar el ahorro anual generado por el sistema (Ingresos) con el LCOE calculado, se obtuvo un flujo neto de caja constante de S/. 7,581.48 por año. [30]

El análisis financiero mostró que el proyecto es viable, arrojando un VAN positivo de S/. 7,955.03. Un VAN positivo indica que el valor presente de los ingresos excede el valor presente de los costos. Este resultado está en línea con la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 12.00%, la cual es superior a la tasa de descuento utilizada para el VAN (10%) y es exactamente igual a la tasa utilizada para calcular el LCOE. Finalmente, el proyecto presenta un rápido Periodo de Repago de 7.46 años, lo que refleja una recuperación eficiente de la inversión inicial en comparación con el tiempo total de vida útil del sistema. [8]

VI. DISCUSIÓN

La presente investigación tiene como propósito fundamental proponer un sistema de bombeo y riego fotovoltaico (SBPF) con adaptabilidad climática para una parcela de 7 hectáreas de caña de azúcar en Chimbote, Áncash. A continuación, se discuten los resultados obtenidos frente a la literatura previa y los marcos teóricos establecidos.

En relación con el primer objetivo específico, se establece una demanda hídrica diaria de 370.3 m³ para el cultivo de caña de azúcar. Este volumen es significativamente superior a los 40 m³ diarios reportados por Davalos en su estudio en Cajamarca y a los requerimientos de café analizados por Herrera y Vera en Amazonas. Esta discrepancia se explica por la escala de la parcela (7 hectáreas frente a 1 hectárea en los antecedentes) presentada en el trabajo mencionado y en la naturaleza intensiva del cultivo de caña de azúcar en la costa peruana. No obstante, la metodología de cálculo basada en datos de la NASA Power coincide con la empleada por Davalos y Herrera y Vera, validando el uso de fuentes satelitales para zonas con escasa instrumentación local. [8]

Esta adaptabilidad climática responde a la problemática planteada por el CECADE en Cusco, donde el sistema se veía limitado por el descenso del nivel freático a pesar de tener radiación óptima. Al proponer un sistema híbrido que interactúa con la red nacional y utiliza baterías de litio, se supera la vulnerabilidad de los sistemas aislados, garantizando la resiliencia productiva frente a fenómenos meteorológicos extremos, tal como sugiere la FAO sobre la necesidad de fortalecer el sector hídrico con tecnologías sostenibles.

Sobre el tercer objetivo, la evaluación económica arroja un VAN de S/. 7,955.03 y una TIR del 12.00%. Aunque la TIR es menor al 18.20% reportado por Herrera y Vera, es superior al 5.43% de Ortega y Díez en España y al 9% de Davalos. El periodo de recuperación de 7.46 años es coherente con el rango de 7 a 8 años hallado en la literatura internacional por Reves en proyectos en Portugal y Marruecos y en los estudios nacionales mencionados. [9]

La inversión inicial de S/. 56,586.09 es elevada en comparación con otros pilotos, lo cual se justifica por la inclusión de baterías de litio de alta vida útil y la infraestructura de automatización. Sin embargo, el análisis demuestra que el costo nivelado de la energía (LCOE) de S/. 0.781/kWh hace que el sistema sea competitivo frente al uso de combustibles fósiles, que están sujetos a volatilidad de

precios. Esta solidez financiera respalda la premisa del Banco Mundial sobre la efectividad de la inversión agrícola para el crecimiento económico y la reducción de la pobreza. [4]

En síntesis, la coincidencia en la rentabilidad financiera entre este estudio y los antecedentes confirma que la tecnología fotovoltaica es una solución madura para el agro peruano. La diferencia fundamental y el aporte de esta tesis es la transición de un diseño estático a uno dinámico y adaptativo. Mientras que los estudios previos validan la capacidad de bombeo, esta investigación valida la gestión inteligente del recurso, alineándose con las necesidades de desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático que la realidad nacional exige. La validación mediante el software SISIFO, que arrojó una generación estimada de 12,217 kWh anuales, refuerza la viabilidad operativa técnica frente a los métodos tradicionales de selección de bombas.

V. CONCLUSIONES

La implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico automatizado con ajuste dinámico de inclinación representa un avance en la eficiencia energética aplicada a la agricultura asistida por energías limpias. Se concluyó que la capacidad de modificar el ángulo de los paneles solares mes a mes, basándose en la trayectoria solar óptima para la latitud del proyecto, permite maximizar la captación de radiación en comparación con estructuras fijas tradicionales de manera significativa.

Para el desarrollo de esta investigación, se determinaron con precisión los parámetros de demanda hídrica y energética necesarios para el cultivo de caña de azúcar en un terreno de 7 hectáreas. A través del análisis de datos climáticos y fenológicos, se estableció una demanda hídrica diaria de 370.3 m³, lo cual, sumado a las necesidades de presión del sistema de riego y las pérdidas por fricción, resultó en una demanda energética eléctrica máxima de 19.8 kWh/día.

Con el fin de satisfacer estas demandas, se dimensionó y seleccionó un conjunto de componentes robustos y eficientes. El sistema consta de un generador fotovoltaico de 7.06 kWp compuesto por 13 paneles monocristalinos de 575 W, gestionados por un inversor híbrido de 8 kW que integra la conexión a la red y un banco de baterías de litio de 15.36 kWh para respaldo. Hidráulicamente, se seleccionaron bombas de la marca Pedrollo, diferenciando una unidad para la captación y otra para la irrigación, controladas por un PLC Siemens S7-1200.

La validación técnica del diseño se llevó a cabo mediante una simulación exhaustiva en el software SISIFO. Esta herramienta permitió contrastar los cálculos teóricos con modelos de radiación y comportamiento de componentes en un entorno virtual, la simulación, por la naturaleza del software, posee diferencias sustanciales en lo que respecta a las especificaciones más delicadas de los componentes usados en la simulación, pero aun así arrojan datos relevantes, comparables y en algunos casos aplicables para el proyecto.

El sistema dimensionado proporciona un estimado de generación energética de 12,217 kWh/año. La simulación cumplió el propósito de verificar la viabilidad operativa del

sistema a largo plazo arrojando una generación energética similar con un aproximado teórico de 13,456.85 kWh/año en condiciones ideales, demostrando que la configuración propuesta es capaz de cubrir la demanda de las bombas y mantener la carga de las baterías.

Finalmente, la evaluación económica confirma la viabilidad financiera del proyecto bajo las condiciones actuales. Con una inversión inicial proyectada de S/. 56,586.09 y costos de operación y mantenimiento anuales de S/. 1,960.00, el análisis arrojó un Valor Actual Neto (VAN) positivo de S/. 7,955.03 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 12.00%. Estos indicadores, sumados a un periodo de recuperación de la inversión de 7.46 años dentro de una vida útil de 20 años, demuestran que la propuesta es rentable y sostenible económicamente, ofreciendo una alternativa competitiva frente a los métodos tradicionales de bombeo basados en combustibles fósiles o tarifas eléctricas convencionales

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

A la Universidad Cesar Vallejo por permitir hacer uso de sus laboratorios para la elaboración del presente trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] Autoridad Nacional del Agua, "Estadísticas del agua en el Perú," ANA, Lima, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/4292/ANA0002795.pdf?sequence=1>
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "Energía solar fotovoltaica para el bombeo de agua con fines de riego," FAO, Roma, 2011.
- [3] Comisión Económica para América Latina y el Caribe, "Energías renovables en la agricultura de América Latina y el Caribe: Oportunidades y desafíos," CEPAL, Santiago, 2016.
- [4] Banco Mundial, "Panorama general: La agricultura," 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview#2>
- [5] J. Davalos, "Diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el caserío la Guayaba, distrito de Bellavista, Jaén – Cajamarca," Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén, Jaén, 2019. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/71/1/Davalos_PJ.pdf
- [6] A. Calero, "Instalación de riego con bombeo solar fotovoltaico en Benlloch," Trabajo de fin de grado, Universitat Jaume I, Castelló de la Plana, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repositori.uji.es/items/0bf07034-bf93-40dc-9720-e8f2c573256a>
- [7] R. M. E. Herrera Fuentes y J. E. Vera Olivera, "Dimensionamiento de un Sistema de Bombeo Solar para Riego Agrícola en el Centro Poblado Roblepampa, Utcubamba–Amazonas," Tesis de pregrado, Univ. Nac. de Jaén, 2020. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/213/1/Herrera_FRME_Vera_OJE.pdf
- [8] J. Dávalos Pongo, "Diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico para riego agrícola en el caserío la Guayaba, distrito de Bellavista, Jaén–Cajamarca," Tesis de pregrado, Univ. Nac. de Jaén, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/71>
- [9] R. Ortega y E. Díez, "Instalación de un sistema de riego por goteo para el cultivo del maíz San Cebrián de Campos en (Palencia)," Universidad de Valladolid, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/3357>
- [10] R. Reves, "Large power hybrid PV pumping for irrigation," Universidad Politécnica de Madrid, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/53856/>
- [11] I. Saady et al., "Improving photovoltaic water pumping system performance with PSO-based MPPT and PSO-based direct torque control using real-time simulation," Sci. Rep., 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-00297-8>

- [12]S. Balakumar, M. Lemma, y M. Godato, "Solar-powered ANN-based MPPT with zeta converter for BLDC motor water pumping in rural Ethiopia for sustainable agriculture," *Discover Sustain.*, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s43621-025-00893-8.pdf>
- [13]OECD/Eurostat, *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*, 4ta ed. París: OECD Publishing, 2018. doi: 10.1787/9789264304604-en.
- [14]J. Castro, L. Gómez, y E. Camargo, "La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI," *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, vol. 13, n.º 1, 2023. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2023000100140
- [15]R. Hernández-Sampieri et al., *Metodología de la investigación*, 6ta ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2014.
- [16]F. N. Kerlinger y H. B. Lee, *Investigación del comportamiento: Métodos de investigación en ciencias sociales*, 4ta ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2002.
- [17]G. Conway, "Agroecosystem analysis," Imperial College Centre for Environmental Technology, Londres, 1983.
- [18]J. A. Duffie, W. A. Beckman, y N. Blair, *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*, 5ta ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020.
- [19]J. Doorenbos et al., "Yield response to water," *FAO Irrigation and Drainage Paper 33*, Roma, 1986.
- [20]W. G. Cochran, *Sampling Techniques*, 3ra ed. Nueva York: John Wiley & Sons, 1977.
- [21]SENAMHI, "Datos meteorológicos," Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/>
- [22]NASA, "Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER)," National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 2024. [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/>
- [23]G. Baca Urbina et al., *Evaluación de proyectos*, 9na ed. México: McGraw-Hill, 2022.
- [24]J. Mun, *Real options analysis: Tools and techniques for valuing strategic investments and decisions*, 2da ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012.
- [25]National Academy of Sciences et al., *On being a scientist: a guide to responsible conduct in research*, 3ra ed. Washington, D.C.: National Academies Press, 2009.
- [26]L. O. Laurencio y R. M. Laurencio, "Análisis energético de un sistema fotovoltaico integrado a una cubierta plana horizontal," *Revista de Ingeniería*, 202x. [Faltan datos de publicación específicos].
- [27]B. MENDIVIL et al., "Estudio agrológico y valorización: Irrigación de las pampas de Chimbote (zona del estado)," *Autoridad Nacional del Agua*, Lima. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/4581/ANA0002993.pdf>
- [28]R. Ortega Rey et al., "Instalación de un sistema de riego por goteo para el cultivo del maíz en San Cebrián de Campos (Palencia)," *Univ. de Valladolid*, 2013.
- [29]M. Pareja Aparicio, *Energía solar fotovoltaica*, 3ra ed. Barcelona: Marcombo, 2020.
- [30]Ministerio de Energía y Minas, "Código Nacional de Electricidad - Suministro," Edición 2011, Lima, 2011.
- [31]J. Ramos, R. Santillan, D. Anticona, and M. Toh, "Diseño y análisis de un sistema solar fotovoltaico mediante el software PVSyst en un centro comercial Lima-Perú," 2024, doi: 10.18687/LEIRD2024.1.1.520.
- [32]I. Saady, B. Majout, B. Bossoufi et al., "Improving photovoltaic water pumping system performance with PSO-based MPPT and PSO-based direct torque control using real-time simulation," *Scientific Reports*, vol. 15, p. 16127, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-00297-8.