

Metodología para el dimensionamiento de sistemas de bombeo solar fotovoltaico en comunidades rurales de altura: caso de estudio de Molinero (Raquaypampa, Bolivia)

Methodology for the sizing of photovoltaic solar pumping systems in high-altitude rural communities: case study of Molinero (Raquaypampa, Bolivia)

Virginia Samca M.¹, Lizeth Justiniano Á.², Juan P. Aruchari F.³, Juan C. Coca M.⁴, Carlos A. A. Fernández Vasquez⁵

Correo de correspondencia: samca.virginia100@gmail.com

Resumen

Este estudio propone el diseño y dimensionamiento de un sistema de bombeo solar fotovoltaico destinado a garantizar el suministro sostenible de agua en la comunidad de Molinero (Subcentral Raquaypampa), ubicada en Cochabamba, Bolivia. Se cuantificó la demanda hídrica proyectada hasta el año 2050 para una población de 296 habitantes, estimando un consumo de 40,92 litros por persona al día. Además, se analizaron datos pluviométricos del periodo 2005–2025, considerando un coeficiente de escorrentía de 0,42 y un área de captación de 47.178,60 m². Mediante modelado hidráulico en WaterCAD y AutoCAD, se definió la red de distribución domiciliar y con Python se obtuvo la ubicación óptima del reservorio. El sistema fotovoltaico contempla dos bombas de corriente continua de 320 W cada una, alimentadas por módulos solares monocristalinos con controladores MPPT con una eficiencia adecuada (PR) del 61,70 %. El sistema incluye un tanque de almacenamiento de 20 m³ y un reservorio de 2.944,69 m³, garantizando caudales entre 0,14 y 0,20 litros por segundo. El análisis de costo de ciclo de vida (LCC) a 25 años estima una inversión de USD 49.505,69 sin considerar el valor residual. El proyecto promueve la sostenibilidad ambiental, la equidad en el acceso al agua y la reducción de emisiones de CO₂.

Palabras clave: bombeo solar fotovoltaico, dimensionamiento hidráulico, sistema de distribución de agua, energía solar, demanda hídrica.

Abstract

This study proposes the design and sizing of a photovoltaic solar pumping system aimed at ensuring the sustainable supply of water for the community of Molinero (Subcentral Raquaypampa), located in Cochabamba, Bolivia. The projected water demand was quantified through the year 2050 for a population of 296 inhabitants, estimating a consumption of 40,92 liters per person per day. Additionally, pluviometric data from the period 2005–2025 were analyzed, considering a runoff coefficient of 0,42 and a catchment area of 47.178,60 m². Using hydraulic modeling in WaterCAD and AutoCAD, the domestic distribution network was defined, and the optimal location of the reservoir was determined using Python. The photovoltaic system includes two direct current pumps of 320 W each, powered by monocrystalline solar modules with MPPT controllers, achieving an adequate performance ratio (PR) of 61,70%. The system incorporates a 20 m³ storage tank and a 2.944,69 m³ reservoir, ensuring flow rates between 0,14 and 0,20 liters per second. The life cycle cost (LCC) analysis conducted for a 25-year horizon estimated a total investment of USD 49.505,69, excluding consideration of the residual value. This project promotes environmental sustainability, equity in water access, and the reduction of CO₂ emissions.

Keywords: photovoltaic solar pumping, hydraulic sizing, water distribution system, solar energy, rural water demand.

1. Introducción

El acceso a recursos básicos como el agua y la energía es fundamental para el desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida, específicamente en comunidades rurales aisladas de países en desarrollo (Sanchez et al., 2022). A nivel global, estudios señalan que aproximadamente el 16% de la población mundial no tiene acceso a electricidad (VanDerslice, 2011) y 663 millones de personas sufren de una grave escasez de agua (WHO/UNICEF, 2015),

¹ Centro Universitario de Investigaciones en Energías, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0000-2201-1366>

² Centro Universitario de Investigaciones en Energías, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0004-7864-3011>

³ Centro Universitario de Investigaciones en Energías, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0000-8045-7980>

⁴ Centro Universitario de Investigaciones en Energías, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0003-4332-4523>

⁵ University of Liège. <https://orcid.org/0000-0002-7940-9364>

históricamente muchas zonas rurales han sufrido una escasez grave de agua lo que dificulta su desarrollo (Dos Santos et al., 2017). Desde entonces en estas áreas, las opciones tecnológicas tradicionales como el diésel y gasolina, para el bombeo de agua han sido más utilizadas (Acıkkalp et al., 2014; Zou et al., 2013). Sin embargo, estos mismos emiten grandes cantidades de gases contaminantes y contribuyen al agotamiento de los recursos naturales (Azzouz et al., 2017).

Diversos estudios, tanto experimentales como teóricos, como los de Zubair, (2024) y Djimbi Makoundi et al. (2024), destacan que los sistemas de bombeo solar son altamente eficientes y amigables con el medio ambiente, promoviendo una gestión de agua responsable. Asimismo, confirman que la viabilidad técnica y económica ofrece ahorros significativos a largo plazo frente a sistemas tradicionales. Además, su operación es independiente de combustibles fósiles, electricidad convencional y sistemas tradicionales, mostrando la gestión eficiente del recurso hídrico (Amb Green Power, s.f; Tecnovasol Energía, s.f.). Esto significa que cada litro de combustible fósil no consumido representa una reducción significativa en las emisiones de CO₂ (Solar SG, s.f.; Van Campen et al., 2000). Es importante manifestar que, si bien muchos estudios se centran en el uso de bombeo solar para fines agrícolas, existen pocas investigaciones sobre su viabilidad para usos domésticos en sitios rurales (Allouhi et al., 2019).

La comunidad de Molinero (latitud -18.261023°, longitud -65.390245°), situada en Raqaypampa, en la provincia Mizque del departamento de Cochabamba - territorio indígena de las Tierras Altas rurales de Bolivia, se caracteriza por limitaciones en el acceso a servicios de energía y agua. Actualmente el 33% de los hogares rurales en Bolivia carece de acceso a agua, lo que impacta negativamente la salud y la productividad de sus habitantes. (Sendera ONG, s.f.). Específicamente, en Raqaypampa, el agua se obtiene de reservorios y ríos; sin embargo, uno de los ríos proviene de una zona minera, lo que implica riesgos para la salud (Ledezma, 2003).

En el estudio de Ida Fuchs et al. (2024), basados en el análisis climático, mediante el Sistema de Información Geográfica PV (PVGIS), utilizando datos de un Año Meteorológico Típico (TMY), revele que la zona cuenta con alto potencial de energía solar, considerando variables como la, radiación solar, elevación del sol, y temperatura ambiente (Fuchs et al., 2024). Estos estudios sugieren que el diseño e implementación de un sistema de bombeo solar, podría garantizar el acceso a agua limpia, reduciendo el riesgo de enfermedades en la comunidad.

El presente trabajo tiene por objetivo diseñar un sistema de bombeo solar fotovoltaico para la comunidad de Molinero (Raqaypampa), que garantice el acceso sostenible al agua mediante un dimensionamiento hidráulico y energético adecuado. A diferencia de la mayoría de estudios realizados en Bolivia en comunidades como Aguas Negras en Santa Cruz, Huatapampa y Ventilla en La Paz (IICA, 2022; Practical Action, 2025; Castellón Torrico, 2024), que se enfocan principalmente en el dimensionamiento de sistemas de bombeo solar para el abastecimiento inmediato de un número limitado de familias, en la misma línea, se destacan trabajos académicos de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón, tales como el diseño de sistemas de bombeo solar para riego agrícola en Wasarani, Vacas (García Rojas, 2024), el dimensionamiento de sistemas para riego por goteo en Cliza (Salazar Villarroel, 2024). Estas investigaciones evidencian el creciente interés nacional por soluciones energéticas sostenibles en el ámbito rural. El presente trabajo se centra en el diseño prospectivo de un sistema capaz de cubrir la demanda futura proyectada hasta el año 2050, integrando herramientas de simulación hidráulica (WaterCAD y AutoCAD) y optimización computacional en Python para definir la ubicación estratégica del reservorio, combinadas con la validación energética mediante PVsyst. Este enfoque no solo garantiza la sostenibilidad del suministro de agua a largo plazo, sino que también proporciona una metodología replicable para comunidades rurales con características similares.

2. Material y métodos

Con el fin de lograr un adecuado diseño del sistema de Bombeo propuesto, se estructuró una metodología conformada por dos áreas de trabajo complementarias y desarrolladas en paralelo: a) el diseño del sistema de bombeo; orientado a la

caracterización de las condiciones del caso de estudio como demanda hídrica, caudal, área de captación pluvial, volumen del reservorio, volumen del tanque almacenamiento, planimetría, altura dinámica total (TDH), potencia de bombeo hidráulico y parámetros clave para el dimensionamiento del sistema, b) el diseño del sistema fotovoltaico; enfocado en el análisis de la radiación solar local, la aplicación de herramientas de simulación, evaluación de indicadores técnicos y económicos que permitan validar la viabilidad del sistema de bombeo solar. A continuación, se presenta un resumen de los principales componentes de cálculo y las consideraciones adoptadas en cada una de estas áreas.

Diseño del sistema de bombeo

Demanda hídrica

La demanda de agua se determinó de datos poblacionales históricos proyectados al 2050 y valores estándar de dotación hídrica per cápita. Para considerar diferentes alternativas de crecimiento poblacional, se desarrollaron 3 escenarios en función de las tasas de crecimiento del país.

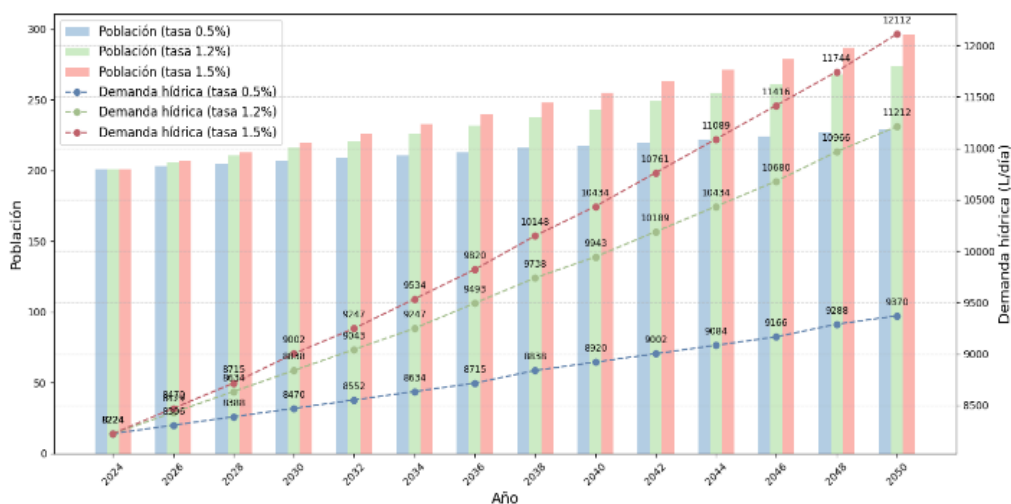
Caudal

El caudal medio diario (Q_{md}) se determinó en base a la población futura (Figura 1) y dotación futura al 2050, con la ecuación (1).

$$Q_{md} (l/s) = \frac{P_f D_f}{86.400} \quad (1)$$

Figura 1

Proyección de demanda hídrica y población en la comunidad Molinero (2024-2050)



Fuente. Elaboración propia, 2025

Para ello, se calcula la dotación futura (D_f) de agua aplicando la ecuación (2), con base en la demanda hídrica, se establece una dotación inicial (D_o) de 30 l/hab-d (mínimo) para sistemas de conexiones domiciliarias, considerando un incremento anual (d) de 1,25%, con una proyección de 25 años.

$$D_f (l/hab - d) = D_o \left(1 + \frac{d}{100}\right)^t \quad (2)$$

También se estimó el caudal máximo diario ($Q_{m\acute{a}x.d}$) y el caudal máximo horario ($Q_{m\acute{a}x.h}$) de acuerdo a la ecuación (3) y (4) que representa el día de mayor consumo del año, considerando un coeficiente de caudal máximo diario (k_1) de 1,40 y un coeficiente de caudal máximo horario (k_2) de 2.

$$Q_{m\acute{a}x.d}(l/s) = k_1 Q_{md} \quad (3)$$

$$Q_{m\acute{a}x.h}(l/s) = k_2 Q_{m\acute{a}x.d} \quad (4)$$

Área de captación pluvial

Para determinar el área de captación pluvial, se realizó un análisis de precipitaciones y evapotranspiración históricas. Para el dimensionamiento del sistema de captación de agua pluvial se utilizan las siguientes ecuaciones (Unidad de Apoyo Técnico en Saneamiento Básico Rural, 2001).

$$A_{ai}(m^3) = A_{a(i-1)} + \frac{P_{pi} \times Ce \times Ac}{1.000} \quad (5)$$

Donde: A_{ai} es el volumen acumulado al mes “i”, P_{pi} la precipitación promedio mensual (mm/mes), Ce el coeficiente de escorrentía y Ac : el área de captación (m^2)

$$D_{ai} = D_{a(i-1)} + Nu \times Nd_i \times D_{di} \quad (6)$$

Donde: D_{ai} es la demanda acumulada al mes “i”, Nu el número de usuarios que se benefician del sistema, Nd_i el número de días del mes analizado y D_i el volumen de agua demandada por los usuarios para el mes “i”.

$$V_i(m^3) = A_i - D_i \quad (7)$$

Donde: V_i es el volumen del reservorio de almacenamiento necesario para el mes “i”, A_i el volumen de agua que se captó en el mes “i”, D_i el volumen de agua demandada por los usuarios para el mes “i”. Para la determinación del coeficiente de escorrentía se empleó el método de Prevert, considerando tres escenarios bajo, medio y alto. El volumen de evaporación mensual de agua libre se calculó mediante las ecuaciones 8 y 9,

$$V_{evap,m}(m^3/mes) = \frac{E_{agua,m}}{1000} \times A \quad (8)$$

$$E_{agua,m}(mm/mes) = K_l \times ET0_m \quad (9)$$

Donde: $E_{agua,m}$ es la evaporación mensual, K_l es el coeficiente de lago (adimensional), típicamente entre 1,0 y 1,2, $ET0_m$ es la evapotranspiración de referencia acumulada del mes, en mm/mes (suma de $ET0$ diaria) y A es el área superficial del reservorio en m^2 . (Allen et al., 1998).

Volumen del reservorio

El volumen del reservorio corresponde al mayor déficit acumulado de la diferencia entre abastecimiento y demanda acumulada de un balance hídrico mensual, considerando como aportes la precipitación efectiva del área de captación y como pérdidas la evaporación.

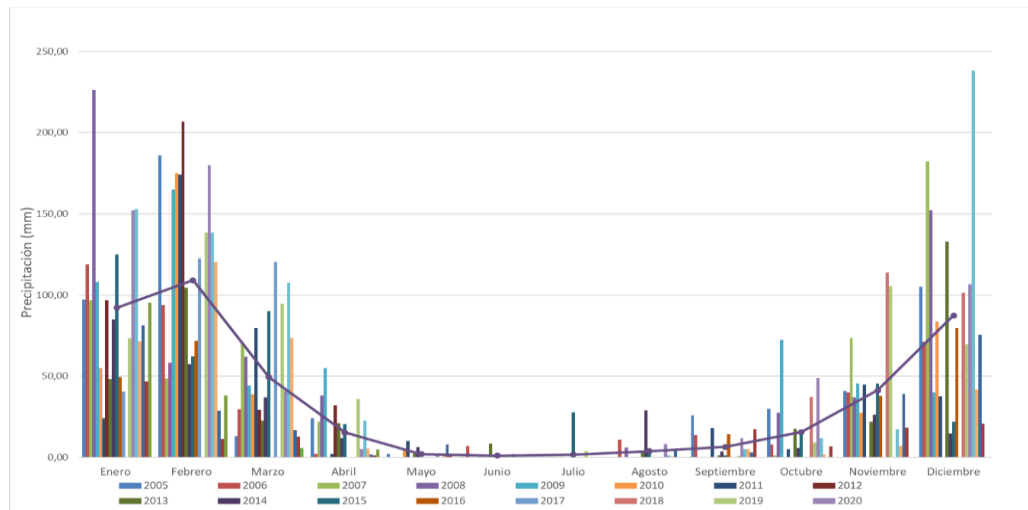
Volumen del tanque de almacenamiento

Por otra parte, el volumen del tanque de almacenamiento de consumo diario, se calcula con la ecuación (10), de acuerdo a las precipitaciones de la comunidad como se muestra en la Figura 2, (t_T), considerando el caudal diario (Q_d)

$$V_d(m^3) = Q_d * t \quad (10)$$

Figura 2

Variación de la precipitación mensual por año (2005-2020)



Fuente: Elaboración propia, 2025

Planimetría para la distribución doméstica

Se llevó a cabo una planimetría con el objetivo de cuantificar las viviendas beneficiadas y diseñar la red de distribución de agua. Para el análisis altimétrico, se generaron curvas de nivel, posteriormente integradas en la simulación hidráulica usando herramientas computacionales como, AutoCAD, civilCAD, WaterCAD y google Earth.

Altura dinámica total (TDH)

La altura dinámica total (TDH), se calcula con la ecuación (11), donde la altura geométrica (H_g) es la diferencia de elevación entre el reservorio y el tanque, las pérdidas menores (H_m) por accesorios (válvulas y codos) y pérdidas por fricciones (H_f) debido a las tuberías (Streeter et al., 2019; Cengel & Cimbala, 2018).

$$TDH (m) = H_g + H_f + H_m \quad (11)$$

Potencia de bombeo hidráulico

El cálculo de potencia hidráulica requerida para el sistema se realizó con la ecuación 12, donde la densidad del agua es 1000 kg/m³, el rendimiento del sistema ($N_{sist.}$) es 85 % y la eficiencia de la bomba (N_{bomba}) de 75 %, esta misma se seleccionó de acuerdo a las características presentadas en la Tabla 1. (Nellis & Klein, 1994; Lorentz, 2022; Allouhi et al., 2019).

$$Pot (W) = \frac{\rho * Q * TDH}{367 * N_{sist} * N_{bomba}} \quad (12)$$

Tabla 1

Características de la bomba de agua

Detalle	
Modelo	PS20-HR-07-MPPT
Fabricante	LORENTZ
Tecnología	Sumergible (Cavidad Progresiva)
Tipo de motor	CC sin escobillas
Potencia eléctrica nomin	320,00 W
Configuración	2 bombas en paralelo

Fuente: Elaboración Propia, 2025

Tabla 2

Características del tanque de almacenamiento

Detalle	
Volumen útil	20,00 m ³
Diámetro interno	2,96 m
Altura total	3,23 m
Material	Polietileno de alta densidad con protección UV

Fuente: Elaboración Propia. 2025

Diseño del sistema fotovoltaico

El esquema metodológico de selección de los componentes para diseño sistema fotovoltaico se presenta en la Figura 3.

Figura 3

Diagrama de flujo para la selección de componentes del sistema de bombeo solar



Fuente: Elaboración propia, 2025

Análisis de la radiación solar local

En cuanto a la hora solar pico, se estima el valor mínimo (5,17 kWh/m²/día) correspondiente al mes de junio para evitar inconvenientes en el sistema de acuerdo a la ecuación 13. (Nellis & Klein, 1994; Virtanen et al., 2020).

$$Q \text{ (m}^3\text{/h)} = \frac{\text{Demanda Diaria (m}^3\text{)}}{\text{Horas Solar Pico (HSP)}} \quad (13)$$

Configuración del arreglo fotovoltaico

Para la energía requerida del sistema fotovoltaico; se aplicó la ecuación 14, donde Pot es la potencia requerida por la bomba, determinada en el punto 2.1.8., HSP es el promedio de Horas Sol Pico de la comunidad, N_MPPT es la eficiencia del controlador.

$$E \text{ (Wh/día)} = \frac{Pot * HSP}{N_{MPPT}} \quad (14)$$

Para la selección del controlador y los paneles solares se analizó las características requeridas en este estudio presentadas en la Tabla 3 y 4. (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), 2022).

Simulación y validación

La simulación consideró las ubicaciones de los hogares, con restricciones altimétricas sobre la posición estratégica respecto al cauce (Cengel & Cimbala, 2018; García-Rodríguez et al., 2021). Mediante un modelo de optimización multiobjetivo, se determinó la ubicación óptima del reservorio. El algoritmo, implementado en Python con SciPy y Geopy utilizó el método Nelder-Mead, logrando convergencia en 247 iteraciones con un error relativo de 1×10^{-6} (Virtanen et al., 2020). Se validó la simulación con el software PVsyst usando datos NSRDB-NREL por su precisión y validación para zonas altas de Bolivia.

Tabla 3

Características del controlador CC con MPPT

Detalle	
Modelo	PCB-90
Fabricante	SOLARJACK
Potencia nominal de entrada	500,00 W
Voltaje mínimo en MPP	24,00 V
Voltaje máximo en MPP	60,00 V
Voltaje máximo del arreglo fotovoltaico	100,00 V
Eficiencia pico	95,00 %
Umbral de activación	5,00 W

Fuente: Elaboración Propia. 2025

Indicadores de rendimiento

Los indicadores de rendimiento se calcularon con las ecuaciones 15 y 16, donde la energía efectiva en bomba (Yf) es la producción real de un sistema fotovoltaico, incluyendo pérdidas, medidas en kWh/kWp.

$$Yf = \frac{E_{PV} - (EL_C + EL_S + EL_U)}{P_{PV}} \quad (15)$$

$$PR = \frac{Y_F}{Y_r} \quad (16)$$

La Relación de rendimiento es la eficiencia real del sistema fotovoltaico, calculada de la energía efectiva en bomba entre la energía teórica en condiciones ideales (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme [IEA PVPS], 2022).

Tabla 4
Características de paneles fotovoltaicos

Detalle	
Modelo	AE 200 SMB-36
Fabricante	AE SOLAR
Configuración eléctrica	2 módulos en serie por string
Tecnología	Silicio monocristalino, PERC.
Número de celdas	36
Potencia nominal por módulo	200,00 Wp
Corriente de cortocircuito (Isc)	10,67 A
Voltaje en circuito abierto (Voc)	24,03 V
Corriente en punto de máxima potencia (I _{mpp})	9,64 A
Voltaje en punto de máxima potencia (V _{mpp})	20,75 V
Coefficiente de temperatura de potencia	-0,37 %/°C
Área superficial del módulo	1,04 m ²

Fuente: Elaboración Propia. 2025

Análisis económico

Para el análisis económico se utilizó la metodología de Costo del Ciclo de Vida (LCC), que estima el costo total actualizado del sistema. (Kneifel & Webb, 2020).

$$LCC = \sum_{t=0}^N \frac{C_t}{(1+d)^t} \quad (17)$$

Donde C_t es la suma de los costos relevantes del año t , N es el horizonte de evaluación del y d es la tasa de descuento. Dado que el sistema opera con energía solar y agua de lluvia almacenada no incurre en costos de compra de energía eléctrica ni de consumo de agua; por ello la ecuación 17, se adaptó a las categorías atribuibles al proyecto -inversión inicial, mantenimiento anual, reposición de componentes y valor residual, planteada en la ecuación 18.

$$LCC = I + \sum_{t=1}^N \frac{M_t}{(1+d)^t} + \sum_j^N \frac{R_j}{(1+d)^{t_j}} - \frac{VR}{(1+d)^N} \quad (18)$$

Donde I es la inversión inicial, M_t el costo de mantenimiento del año t , R_j el costo de reposición del componente j en el año t_j , VR el valor residual al final del horizonte y N la vida útil de análisis. Se adoptó un horizonte de 25 años, coherente con la vida útil de la infraestructura principal y de los módulos fotovoltaicos, y una tasa de descuento del 8,5 % (Castro Rodríguez & Rueda Gallardo, 2020). Al tratarse de un mantenimiento constante, el primer sumatorio se calculó como el producto del costo anual por el factor de valor presente uniforme (UPV).

3. Resultados y discusión

Dimensionamiento del sistema

La proyección demográfica de Molinero, fue realizada con los censos nacionales de 2003, 2012 y 2024 al 2050 de acuerdo a la Figura 1. Para una tasa de 0,50% con alta migración, se proyectan 229 habitantes y una demanda de 9.370 l/día. Bajo una tasa intercensal entre los años 2012 al 2024 para TIOC Raqaypampa de 1,2% (INE, 2025), la población asciende a 274 habitantes y demanda de agua de 11.212 l/día y el escenario sin migración de mayor crecimiento de 1,5% (Maja & Ayano, 2021; Veneri & Ruiz, 2013), se estiman 296 habitantes y una demanda de agua de 12.112 l/día. Particularmente en este estudio se considera el valor de mayor demanda hídrica, como una medida preventiva y estratégica orientada a asegurar la disponibilidad continua del recurso hídrico en línea con recomendaciones internacionales para sistemas rurales descentralizados (Meah et al., 2008; Allouhi et al., 2019). La dotación de agua proyectada se establece en función de dos parámetros: el estándar normativo y la capacidad real de abastecimiento. La Norma NB 689 (IBNORCA, 2004) fija un requerimiento de 30 l/hab·d para áreas rurales. Sin embargo, el dimensionamiento hidráulico realizado en este estudio, considerando el área efectiva de captación y el balance hídrico, determina una capacidad máxima de 40,92 l/hab·d. Este valor se adopta como parámetro de diseño, ya que representa el límite superior de suministro sostenible y permite garantizar la demanda actual con un margen de seguridad para el crecimiento poblacional y variaciones estacionales en la disponibilidad hídrica.

En cuanto a la distribución de agua, el sistema opera con un caudal medio diario de 0,14 l/s, correspondiente al consumo promedio de la población. El caudal máximo diario alcanza los 0,20 l/s, mientras que el caudal máximo horario se estima en 0,39 l/s de acuerdo a los lineamientos de la Norma NB 689 (IBNORCA, 2004).

Por otro lado, la figura 2 muestra la precipitación mensual durante dos décadas basada en datos de dos estaciones ubicadas en la provincia de Mizque operadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia, (SENAMHI, 2025). Los valores se caracterizan por una estación húmeda que abarca de noviembre a abril, con el mayor pico de precipitación en febrero de 109 mm y la estación seca de mayo a octubre, con precipitaciones mínimas de 1,03 mm en junio, esto sugiere la necesidad de un reservorio para la captación de agua pluvial para compensar la estación seca.

El coeficiente de escorrentía fue evaluado bajo tres escenarios: alto ($C=0,60$), medio ($C=0,42$) y bajo ($C=0,15$), (ANH, 2022; Jahn et al., 2006; Li et al., 2015; LibreTexts, 2022; Reddy et al., 2021). Los resultados muestran que a un mayor coeficiente de escorrentía se requiere una menor superficie de captación; así, con un valor alto, el área de captación es de 33.025 m², con un valor medio de 47.178,6 m², y con un valor bajo hasta 132.100 m². Se adoptó el escenario medio por ser el más representativo de las condiciones locales de suelo y cobertura vegetal, evitando la sobrestimación del escenario alto y la subestimación del escenario bajo. En base a este escenario, la demanda hídrica mensual proyectada se sitúa entre 339.144,96 litros en febrero y 363.369,6 litros en los meses de 30 días, valores que sirvieron como referencia para el dimensionamiento del sistema.

Para asegurar el abastecimiento, el análisis de la Tabla 5, que incorpora las pérdidas por evaporación mensual, se consideró un $K_e=1,05$, recomendado para cuerpos de agua someros, (Allen et al., 1998). Se determinó que el mayor volumen acumulado se presentó en enero, con un valor de 2.944,69 m³. En consecuencia, este volumen constituye la capacidad mínima requerida del reservorio para garantizar el abastecimiento durante todo el periodo evaluado y la ubicación óptima del reservorio se determinó mediante un algoritmo en Python (Nelder-Mead), las coordenadas finales son: lat. -18.258540°, long. -65.392365°, altitud 2.509 m s.n.m.

Tabla 5
Cálculo del volumen abastecimiento vs. demanda para un área de captación de agua 47178,6m²

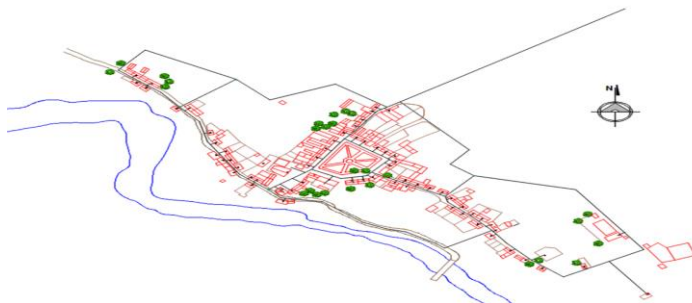
Mes	Precipitación (mm)	Abastecimiento (m ³)				Demanda (m ³)		Diferencia (m ³)
		Parcial	V _{evaporado}	Total abastecimiento	Acumulado	Parcial	Acumulada	
Febrero	109,06	2161,03	103,037	2057,99	2057,99	339,14	339,14	1718,84
Marzo	49,39	978,66	89,426	889,24	2947,23	375,48	714,63	2232,60
Abril	15,25	302,18	92,973	209,21	3156,43	363,37	1078,00	2078,44
Mayo	2,04	40,51	79,861	-39,35	3117,08	375,48	1453,48	1663,60
Junio	1,03	20,48	72,152	-51,68	3065,41	363,37	1816,85	1248,56
Julio	1,76	34,79	64,790	-30,00	3035,40	375,48	2192,33	843,07
Agosto	3,76	74,42	66,473	7,94	3043,34	375,48	2567,81	475,53
Septiembre	6,36	126,09	81,037	45,05	3088,39	363,37	2931,18	157,21
Octubre	15,62	309,53	91,159	218,37	3306,77	375,48	3306,66	0,10
Noviembre	41,20	816,38	107,940	708,44	4015,21	363,37	3670,03	345,17
Diciembre	87,46	1733,04	109,396	1623,65	5638,85	375,48	4045,51	1593,34
Enero	92,21	1827,14	100,306	1726,84	7365,69	375,48	4421,00	2944,69

Fuente: Elaboración propia, 2025

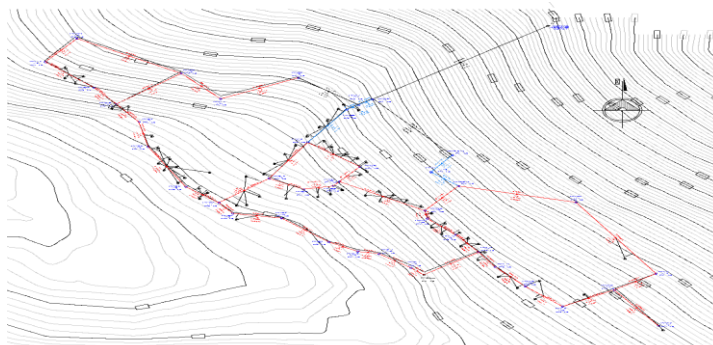
Para garantizar el diseño del tanque de almacenamiento, se plantea un depósito de consumo diario con un volumen de 12,67 m³, optando por un tanque de 20.000 litros. Por otro lado, la planimetría mostrada en la Figura 4, es una distribución de mallas, estableciendo tomas principales de ¾" y derivaciones internas de ½" para cada vivienda, permitiendo una mejor regulación del flujo y una disminución en las pérdidas de agua, asimismo la Figura 5, presenta la simulación hidráulica de la red de distribución, permitiendo determinar una altura óptima del tanque de almacenamiento de 50 m, lo que garantiza el suministro por gravedad y elimina la necesidad de bombeo, reduciendo costos operativos y mejorando la estabilidad del sistema. La altura dinámica total del sistema (TDH) es de 85,20 m, valor superior a la altura del tanque de almacenamiento debido a las pérdidas por fricción y accesorios en tuberías de 502,3m, y 4 pulgadas de diámetro.

Rendimiento del sistema de bombeo fotovoltaico

La simulación nos da una irradiancia global horizontal (GHI) de 6,26 kWh/m²/día un promedio anual, irradiancia difusa horizontal (DHI) de 1,81 kWh/m²/día, temperatura promedio anual de 13,50 °C y velocidad media anual del viento de 2,10 m/s. Los módulos se orientaron a un ángulo azimut a 0° e inclinación de 25° que garantiza un caudal de distribución optima a lo largo del año, considerando pérdidas por sombreado y temperatura para garantizar una simulación realista (Jahn et al., 2006; Duffie & Beckman, 2013)

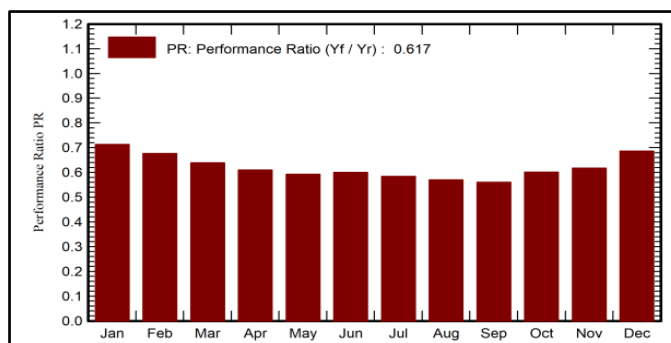
Figura 4*Diseño de distribución de mallas de cañerías en la comunidad Molinero*

Nota. Elaborado en software AutoCAD y Google Earth. Fuente. Elaboración propia, 2025

Figura 5*Simulación hidráulica de red de distribución de agua*

Nota. Elaborado en software WaterCad, Fuente. Elaboración propia, 2025

Se estimó una energía diaria requerida de 4,88 kWh/día, cubierta por módulos monocristalinos y un controlador MPPT. El sistema alcanzó un PR anual del 61,7% (Figura 6), mostrando un rendimiento moderado en comparación con sistemas fotovoltaicos convencionales. El controlador MPPT ayuda a adaptarse a las variaciones de radiación, aunque el PR presenta valores más bajos durante los meses de invierno debido a una menor cantidad de HSP. El diseño conservador asegura operatividad básica incluso en condiciones adversas.

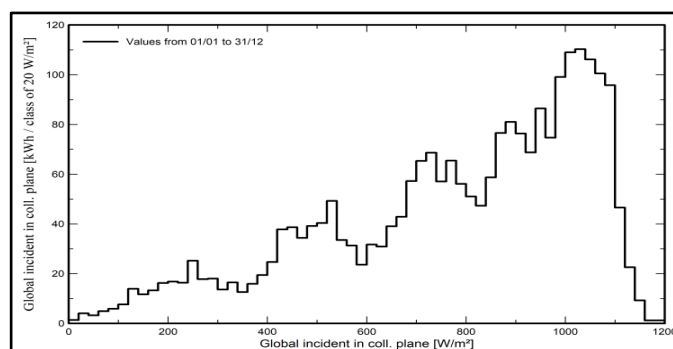
Figura 6*Performance Ratio PR*

Nota. Elaborado en software PVsyst. Fuente. Elaboración propia, 2025

La irradiación, en la Figura 7, varía estacionalmente, con valores máximos de hasta 1200 W/m² y mínimos cercanos a 0 W/m² en el plano de captación. A pesar de esta amplia variabilidad, el sistema mantiene un bombeo continuo dentro de lo posible. El sistema demostró un rendimiento energético satisfactorio como se observa en la Figura 8, con un 17,80% de energía no utilizada. Las pérdidas de captación representaron un 17,10% y las pérdidas del sistema un 3,40%, valores que indican una eficiencia aceptable en el diseño (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2021). La energía efectiva entregada a la bomba (Yf) alcanzó un 61.7% de la energía disponible, operando dentro de los parámetros proyectados durante todo el año. Este desempeño garantiza un suministro continuo de agua, adaptándose adecuadamente a las variaciones estacionales de irradiación en la comunidad.

Figura 7

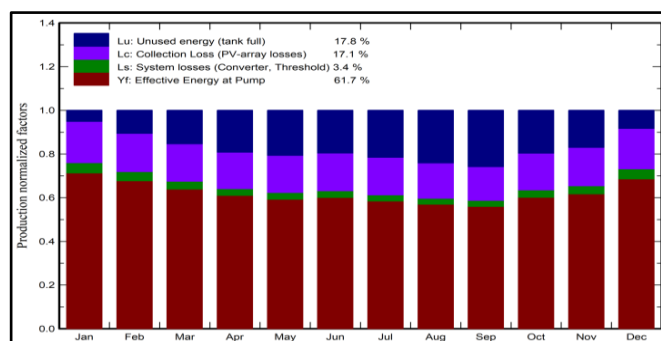
Distribución de irradiación incidente



Nota. Elaborado en software PVsyst. Fuente. Elaboración propia, 2025

Figura 8

Producción normalizada y factores de pérdida



Nota. Elaborado en software PVsyst. Fuente. Elaboración propia, 2025

Análisis económico

El análisis de costo del ciclo de vida, evaluado a 25 años con una tasa de descuento del 8,5 %, dio como resultado un costo total actualizado de USD 49.505,69 en el escenario base sin valor residual. Este monto comprende la inversión inicial (USD 45.100), el valor presente del mantenimiento anual (USD 1.535,13), el valor presente de la reposición de las bombas y el controlador en los años 10 y 20 (USD 2.870,55). Al incorporar un valor residual equivalente al 10 % de la inversión inicial —adoptado de forma conservadora ante la ausencia de una valoración específica por componente (Kneifel & Webb, 2020)—, el LCC se reduce a USD 48.918,96. Véase Tabla 6.

Tabla 6*Análisis de costo de ciclo de vida (LCC)*

Sistema de bombeo solar	
Tasa de descuento	0,085
Horizonte del proyecto (años)	25,00
Inversión inicial (USD)	45.100,00
Mantenimiento anual (USD/año)	150,00
Reposiciones bombas + MPPT (USD por evento)	4.500,00
Años de reposición	10 y 20
Valor residual nominal al año 25 (USD)	4.510,00
Factor Uniform Present Value-UPV (25 años, 8,5%)	10,23
Valor Presente-VP mantenimiento (USD)	1.535,13
Valor presente-VP reposición año 10 (USD)	1.990,28
Valor Presente-VP reposición año 20 (USD)	880,27
Valor presente- VP valor residual (USD)	586,72
LCC sin valor residual (USD)	49.505,69
LCC con valor residual (USD)	48.918,96

Fuente: Elaboración propia, 2025

Impacto social

En este contexto, la implementación de sistemas de bombeo solar permitiría el acceso a agua limpia, reduciendo el riesgo de enfermedades, mejorando la calidad de vida, a su vez, esto disminuiría los gastos en salud y mejoraría la productividad laboral de los comunarios (Sendera ONG, s.f.; Ayuda en Acción, s.f.). Además, esta tecnología fomenta la autosuficiencia y el empoderamiento comunitario, ya que permite a la comunidad gestionar sus propios recursos hídricos sin depender de proveedores externos, lo que promueve la cohesión social alineándose a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y ODS 6) (Naciones Unidas, s.f.).

4. Conclusiones

El diseño desarrollado para el sistema de bombeo solar para la comunidad de Molinero, ubicada en el TIOC de Raqaypampa, se presenta como una alternativa técnicamente viable ya que emplea equipos comercialmente disponibles en el mercado (bombas de corriente continua, módulos fotovoltaicos monocristalinos y controladores MPPT). Económicamente, el sistema también parece representar una opción viable ya que considera una inversión

de USD 48.918,96, menor a la esperada con sistemas convencionales, con un periodo de retorno de 4,7 años. Desde el punto de vista social, el sistema permitiría lograr el acceso a un derecho básico como el agua, alineado con la Política del Vivir Bien en Bolivia y en contribución directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante).

La configuración diseñada contempla una potencia fotovoltaica de 640 Wp, sin baterías y con controlador MPPT. En la literatura, la potencia instalada suele variar entre 300 y 1000 Wp, dependiendo del consumo y las condiciones locales. Por ejemplo, un estudio en India reportó un sistema de 500 Wp con un performance ratio del 60% (Kumar et al., 2025), mientras que en Pakistán se alcanzó un 74,62% (Habib et al., 2023). El valor obtenido en este estudio (61,7%) se encuentra dentro de los rangos reportados, lo que confirma la consistencia del desempeño.

En relación con el tanque de almacenamiento, tiene una capacidad de 20 m³, comparable con otros proyectos en zonas rurales de climas menos severos, donde se han reportado tanques de 5 m³ (Soenen et al., 2021) y 10 m³ (Habib et al., 2023). Este volumen permite cubrir un requerimiento aproximado de 12,11 m³/día, otorgando una autonomía cercana a 2 días, en concordancia con las recomendaciones internacionales que sugieren mantener reservas de 2 a 3 días para sistemas solares en áreas rurales (World Bank, 2018).

Finalmente, el reservorio de gran escala alcanza una capacidad de 2.944,69m³, suficiente para abastecer la demanda estimada durante 243 días, marcado por periodos prolongados de sequía. Otros estudios suelen dimensionar almacenamientos para cubrir entre 30 y 90 días de consumo, lo que exige volúmenes menores (Habib et al., 2023), por lo que responde a la necesidad de priorizar la seguridad hídrica ante déficits pluviales estacionales bajo las directrices internacionales que recomiendan almacenar excedentes en la temporada húmeda para afrontar periodos secos (World Bank, 2018; USACE, 1987; FAO, 2009).

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

5. Referencias bibliográficas

- Acikkalp, E., Aras, H., & Hepbasli, A. (2014). Advanced exergy analysis of a trigeneration system with a diesel–gas engine operating in a refrigerator plant building. *Energy and Buildings*, 80, 268–275. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.046>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2022, abril 12). Mapa Geológico de Bolivia. https://www.anh.gob.bo/InsideFiles/Inicio/Banner/Banner_Id-64-220412-0720-2.pdf
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO.
- Allouhi, A., Buker, M. S., El-houari, H., Boharb, A., Benzakour Amine, M., Kousksou, T., & Jamil, A. (2019). PV water pumping systems for domestic uses in remote areas: Sizing process, simulation and economic evaluation. *Renewable Energy*, 132, 798–812. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.019>
- Amb Green Power. (s.f.). Impacto ambiental del bombeo solar. <https://www.ambgreenpower.com/impacto-ambiental-del-bombeo-solar/?form=MG0AV3>
- Azzouz, A., Borchers, M., Moreira, J., & Mavrogianni, A. (2017). Life cycle assessment of energy conservation measures during early-stage office building design: A case study in London, UK. *Energy and Buildings*, 139, 547–568. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.004>
- Castro Rodríguez, R., & Rueda Gallardo, J. A. (2020). Estimación empírica de la tasa social de descuento: Estudio de caso Bolivia (Serie Documentos CEDE No. 7). Universidad de los Andes, Facultad de Economía.
- Castellon Torrico, K. R. (2024). Diseño de un sistema de bombeo solar para autoconsumo y riego en la comunidad de Ventilla, La Paz [Trabajo de diplomado, Universidad Mayor de San Simón]. Cochabamba, Bolivia.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Djimbi Makoundi, C. D. L. V., Shuting, W., & Bolin, Z. (2024). Optimization of solar water pumping systems for agricultural irrigation: Comparative

- analysis and design of an ideal solution. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 9(7), 274–279. <https://doi.org/10.36348/sjet.2024.v09i07.001>
- Dos Santos, S., Adams, E. A., Neville, G., Wada, Y., de Sherbinin, A., Bernhardt, E. M., & Adamo, S. B. (2017). Urban growth and water access in sub-Saharan Africa: Progress, challenges, and emerging research directions. *Science of the Total Environment*, 607, 497–508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.157>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.
- FAO. (2009). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia: Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. (2021). *Photovoltaics report: Efficiency trends and market overview*. Fraunhofer ISE.
- Fuchs, I., Sanchez-Solis, C., Balderrama, S., & Valkenburg, G. (2024). Swarm electrification for Raqaypampa: Impact of different battery control setpoints on energy sharing in interconnected solar homes systems. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 40, 101535. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101535>
- García-Rodríguez, L., et al. (2021). Solar pumping systems for rural water supply. *Renewable Energy*, 163, 2128–2143. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.056>
- García Rojas, B. (2024). *Diseño de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para riego agrícola en la comunidad Wasarani del municipio Vacas, departamento de Cochabamba*. Universidad Mayor de San Simón. Recuperado de <http://ddigital.umss.edu.bo/handle/123456789/47695>
- Habib, S., Liu, H., Tamoor, M., Zaka, M. A., Jia, Y., Hussien, A. G., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2023). Technical modelling of solar photovoltaic water pumping system and evaluation of system performance and their socio-economic impact. *Heliyon*, 9(5), e16105. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16105>
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). (2004). *Norma Boliviana NB 689: Instalaciones de agua – Diseño para sistemas de agua potable* (2ª rev.). Ministerio del Agua, Viceministerio de Servicios Básicos.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2025). *Resultados – Censo Bolivia*. <https://censo.ine.gob.bo/resultados/>
- Jahn, R., Blume, H.-P., Asio, V. B., Spaargaren, O., & Schad, P. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed.). FAO.
- Kneifel, J., & Webb, D. (2020). *Life cycle costing manual for the Federal Energy Management Program* (NIST Handbook 135, 2020 Edition). National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce. <https://doi.org/10.6028/NIST.HB.135-2020>
- Kumar, M., Arora, P., Srivastava, N., Padma, J., Singh, R., & Bhosale, A. C. (2025). Optimal sizing of solar photovoltaic water pumping systems by synergizing irrigation patterns and static heads: A comprehensive study in the Indian context. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 77, 104341. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104341>
- Ledezma, J. (2003). *Economía andina: Estrategias no monetarias en las comunidades andinas quechuas de Raqaypampa* (Bolivia). Abya-Yala.
- LibreTexts. (2022). *Pendiente y escurriencia*. En *Ciencia del suelo: Introducción al manual de laboratorio de ciencias del suelo*. <https://geo.libretexts.org>
- Li, H., Zhang, Y., & Zhou, X. (2015). Predicting surface runoff from catchment to large region. *Advances in Meteorology*, 2015, Article 720967. <https://doi.org/10.1155/2015/720967>
- Lorentz. (2022). *Solar pumping technical handbook* (7th ed.). Lorentz GmbH & Co.
- Maja, M. M., & Ayano, S. F. (2021). The impact of population growth on natural resources and farmers' capacity to adapt to climate change in low-income countries. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 271–283. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00209-6>
- Meah, K., Ula, S., & Barrett, S. (2008). Solar photovoltaic water pumping—Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1162–1175. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.020>
- Nellis, K., & Klein, S. (1994). *Solar water pumping: Principles and practice*. Prentice Hall.
- Practical Action. (2025). *Perfil de proyecto: Huatapampa*. Practical Action Latinoamérica. https://latam.practicalaction.org/wp-content/uploads/2025/09/2-PerfilProyecto_Huatapampa.pdf

- Redacción. (2022, mayo 27). El IICA implementa en Bolivia un sistema de bombeo solar sumergible que dota de agua a familias campesinas. CAWTV Noticias. <https://www.cawtv.net/noticias/el-iica-implementa-en-bolivia-un-sistema-de-bombeo-solar-sumergible-que-dota-de-agua-a-familias-campesinas/>
- Reddy, B. S. N., Pramada, S. K., & Roshni, T. (2021). Monthly surface runoff prediction using artificial intelligence: A study from a tropical climate river basin. *Journal of Earth System Science*, 130(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01508-8>
- Romero Campos, J. P. (2019). Análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos (Memoria de título). Universidad de Chile.
- Salazar Villarroel, L. A. (2024). Diseño y dimensionamiento de un sistema de bombeo solar para el abastecimiento de agua en el sistema de riego por goteo en el municipio de Cliza, Cochabamba. Universidad Mayor de San Simón. Recuperado de <http://ddigital.umss.edu.bo/handle/123456789/47704>
- Sanchez, C., Di Betta, P., Stevanato, N., Andersen, L., Guzmán, G., Quoilin, S., & Balderrama, S. (2022). The energy sufficiency concept and its impact on energy demand estimation in rural communities from developing countries. In *Proceedings of the 17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES LA 2022)*.
- Sendera ONG. (s.f.). Agua potable en comunidades rurales. <https://www.senderaong.org/proyectos/agua-potable-comunidades-rurales>
- Solar SG. (s.f.). Bombeos solares: La revolución energética para la agricultura. <https://solarsg.es/bombeos-solares-la-revolucion-energetica-para-la-agricultura/>
- Soenen, C., Reinbold, V., Meunier, S., Cherni, J. A., Darga, A., Dessante, P., & Quéval, L. (2021). Comparison of tank and battery storages for photovoltaic water pumping. *Energies*, 14(9), 2483. <https://doi.org/10.3390/en14092483>
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (2019). *Mecánica de fluidos* (11ª ed.). McGraw-Hill.
- Tecnovasol Energía. (s.f.). Bombeo solar: Beneficios y ventajas de una solución sostenible. <https://tecnovasolenergia.com/blog/bombeo-solar-beneficios-y-ventajas-de-una-solucion-sostenible>
- USACE. (1987). Engineer Manual 1110-3-163: Engineering and Design – Water Supply, Storage, and Distribution. U.S. Army Corps of Engineers. https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-3-163.pdf
- Van Campen, B., Guidi, D., & Best, G. (2000). Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles (Documento de Trabajo sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales No. 3). FAO.
- VanDerslice, J. (2011). Drinking water infrastructure and environmental disparities: Evidence and methodological considerations. *American Journal of Public Health*, 101(S1), S109–S114. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2011.300118>
- Veneri, P., & Ruiz, V. (2013). Urban-to-rural population growth linkages: Evidence from OECD TL3 regions. *OECD Regional Development Working Papers*, 2013/03. <https://doi.org/10.1787/5k49lcrq88g7-en>
- Virtanen, P., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- WHO/UNICEF. (2015). Progress on sanitation and drinking water: 2015 update and MDG assessment. WHO/UNICEF.
- World Bank. (2018). Solar Pumping: The Basics. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). World Bank, Washington, DC. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/880931517231654485/pdf/123018-WP-P159391-PUBLIC.pdf>
- Zubair, M. (2024). PV energy penetration in Saudi Arabia: Current status, residential, and commercial users, local investment, use in modern agriculture. *International Journal of Sustainable Engineering*, 17(1), 39–51. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2297262>