

## Impacto Económico de la Tecnología Solar Fotovoltaica en la Extracción de Agua para consumo en las Comunidades Rurales del Altiplano Puneño

### Economic Impact of Photovoltaic Solar Technology in the Extraction of Water for Consumption in the Rural Communities of the Puneño Highlands

---

Reynaldo Condori Yucra

*rcondori@unaj.edu.pe - Universidad Nacional de Juliaca*

Elmer Rodrigo Aquino Larico

*rodrigo19\_x@hotmail.com - Universidad Nacional de Juliaca*

Julio Fredy Chura Acero

*juliofredy@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca*

Wilhem Limachi Viamonte

*limachi.via@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca*

#### Resumen

La extracción de agua en pequeñas y grandes escalas es una aplicación de mucha trascendencia en la actualidad; tiene especial impacto en comunidades rurales donde no hay suministro de energía eléctrica convencional. Los sistemas de bombeo fotovoltaicos se caracterizan por ser de alta confiabilidad, larga duración y mínimo mantenimiento, lo cual se traduce en un menor costo a largo plazo si se le compara con otras tecnologías (Red eléctrica, Grupo electrógeno, etc). Además, no requiere del empleo de un operador y tienen un bajo impacto ambiental (no contaminan el aire o el agua y no producen ruido). Otra ventaja es que los sistemas son modulares, de manera que pueden adecuarse para satisfacer las necesidades específicas del usuario en cualquier momento. Estos sistemas son muy sencillos en su operación. Para realizar un proyecto con éxito es necesario entender conceptos como la energía solar fotovoltaica, la hidráulica del sistema y el funcionamiento del conjunto motor-bomba. Se requerirá una electrobomba sumergible de 10 HP [7,5 kW], que incluye su sistema de protección respectivamente. La bomba debe ser capaz de circular un volumen cercano a los 4.5 l/s. Sin tener problemas con pérdidas de carga en el circuito (impulsión y aspiración). El arreglo fotovoltaico para la extracción de agua estará basado en 48 paneles de 240 Wp modelo SM – 230MA12, controlado por un controlador híbrido modelo CBS11001 de 11000 [kW], con una potencia mínima de generación de los paneles FV de 11.14 [kW] y un intervalo de tensión en continua  $V_{cd}$  de entrada de 560 – 800 Vcc, la altura dinámica total es de 90 m, con una longitud de impulsión de 487.5 m, para una capacidad de 90 m<sup>3</sup>. El costo de operación con un sistema convencional para 6 horas de operación constante es de 2,467.00 U\$ equivalente a 8,192.31 Soles, y el ahorro de energía generado en un año es de 11,224.00 U\$. El costo de operación para diferentes horas de operación durante el año con tecnología solar FV es de 3,380.25 U\$, equivalente a 11,222.42 Soles, y el ahorro de energía generado en un año es de 15,369.00 U\$.

**Palabras claves:** *Energía solar, Extracción de agua, Costo de Operación, Ahorro Económico, agua potable.*

## Abstract

The extraction of water in small and large scales is an application of great transcendence at present; It has a special impact in rural communities where there is no conventional electricity supply. The photovoltaic pumping systems are characterized by high reliability, long duration and minimal maintenance, which translates into a lower long-term cost when compared to other technologies (power grid, generator set, etc.). In addition, it does not require the use of an operator and have a low environmental impact (they do not pollute air or water and do not produce noise). Another advantage is that the systems are modular, so that they can be adapted to meet the specific needs of the user at any time. These systems are very simple in their operation. In order to carry out a successful project, it is necessary to understand concepts such as photovoltaic solar energy, system hydraulics and the operation of the motor-pump unit. A submersible 10 HP [7.5 kW] electric pump, which includes its protection system respectively, will be required. The pump must be able to circulate a volume close to 4.5 l/s. Without having problems with losses of load in the circuit (impulsion and aspiration). The photovoltaic array for the extraction of water will be based on 48 panels of 240 Wp model SM-230MA12, controlled by a hybrid controller model CBS11001 of 11000 [kW], with a minimum generation power of the PV panels of 11.14 [kW] and a voltage range in continuous Vcd of input of 560-800 Vcc, the total dynamic height is 90 m, with a drive length of 487.5 m, for a capacity of 90 m<sup>3</sup>. The cost of operation with a conventional system for 6 hours of constant operation is 2,467.00 U\$ equivalent to 8,192.31 Soles, and the energy savings generated in one year is 11,224.00 U\$. The cost of operation for different hours of operation during the year with solar PV technology is 3,380.25 U\$, equivalent to 11,222.42 Soles, and the energy savings generated in a year is 15,369.00 U\$.

**Keywords:** *Solar energy, Water extraction, Cost of Operation, Economic Saving, drinking water.*

## Introducción

La región de Puno, cuenta con trece provincias y 110 distritos, de los cuales el distrito de Capachica es uno de los que posee mayor población y se encuentra localizado en la cuenca del lago Titicaca, lado este a una altitud aproximada de 3,819 m s.n.m., tiene una latitud de 15° 38' 30" sur y una longitud de 69° 49' 50" oeste. Actualmente cuenta con una población estimada en 11,326 habitantes (CEPLAN, 2017). El lugar de estudio son los sectores Huajeron y Toctoro, que cuentan con 385 familias de cuatro miembros cada una en promedio. El clima es frío y húmedo con una temperatura media anual de 8° a 12°C según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Uno de los parámetros para medir la calidad de vida de una sociedad son los servicios con los que cuentan sus pobladores. Dos de los principales servicios son el agua potable y la energía eléctrica (Cerdán-Cabrera, 2011). El agua también posibilita la vida en un sentido más amplio: el ser humano necesita de agua limpia y saneamiento para preservar la salud y mantener su dignidad, por eso el agua debe ser accesible y segura (PNUD, 2006). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la posibilidad de abastecimiento regular de agua potable constituye un fundamental derecho humano (Katsiri, 2009) y son necesarios, por lo menos, 20 litros de agua cada día por persona para atender sus necesidades básicas (PNUD, 2006). En América del Sur existen grandes áreas semiáridas y regiones secas como: Paraguay, Argentina, Perú, Chile y Bolivia y la región semiárida del noreste brasileño (Ab'Sáber, 1999). El desarrollo de estrategias de supervivencia en una economía precaria, agravada

por el medio físico hostil, es el denominador común de estas poblaciones (Rodríguez, Herrera, Kiskia, Iriarte, & Fabris, 2000).

Los principales factores que determinan la configuración de un sistema de bombeo fotovoltaico son: 1) la altura estática de elevación del agua por encima de la superficie del suelo (por o la profundidad del nivel del agua en el pozo bajo la superficie, 2) la energía suministrada por el generador fotovoltaico a lo largo del día, determinada por la altura dinámica, radiación solar y las condiciones climatológicas (Alonso-Abella & Chenlo-Romero, 2005). Sin embargo, la amplia difusión de estos sistemas aún no sucedió como esperado por razones de apropiación tecnológica y diversos factores (Valer, Moura de Moraes, Morante, Zilles, & Fedrizzi, 2014).

El dimensionado de sistemas de bombeo fotovoltaico se puede abordar mediante diferentes métodos dependiendo su complicación, del número de variables consideradas y del grado de optimización en la obtención de los resultados. En general, existen tres pasos que son necesarios seguir: 1) evaluación de la energía hidráulica necesaria, 2) evaluación de la energía solar disponible y 3) definición del equipo de bombeo necesario (Alonso-Abella & Chenlo-Romero, 2005), y la opción de bombeo fotovoltaico tiene menor costo de ciclo de vida y costo unitario de agua (Ortiz-Ortiz & Aldana, 2013).

Así, el propósito del presente estudio es estimar el impacto económico en la extracción de agua para consumo humano, con tecnología solar fotovoltaica en las comunidades rurales del distrito de Capachica, sectores Huajeron y Toctoro en el altiplano puneño. El punto de la sostenibilidad se situará en función del costo de otro tipo de energía sustituto (Redes

eléctricas, grupos electrógenos, etc.) dando cabida a plantear el abastecimiento de agua potable con tecnología solar fotovoltaica.

### Materiales y métodos

El presente estudio se inició con la evaluación del recurso energético solar, en planos inclinados, tomando como referencia datos de Puno, debido a que son aproximadamente iguales con el lugar de estudio en latitud y altitud, alcanzando un promedio anual  $6,8 \text{ kWh/m}^2$ , estos datos fueron registrados durante cinco años (1977 – 1981) (Meléndez & Yucra, 2005).

En este estudio nos interesa la intensidad de la irradiación en planos inclinados, y según los datos recabados para Puno el mejor aprovechamiento de la irradiación solar sobre el plano inclinado es para el ángulo de inclinación de  $\beta = [0 - 25^\circ]$ , tal como se puede verificar en la tabla 1. El aprovechamiento energético para esas condiciones en promedio es de  $6,4 \text{ kWh/m}^2$ . Luego, en la figura 1, se muestra el comportamiento de las curvas de la radiación solar sobre un plano inclinado para ángulos de inclinación diferentes. En este gráfico se puede ver que para los ángulos beta de  $15^\circ$ ,  $83^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $25^\circ$ , respectivamente, la energía solar es cercana a  $6.0 \text{ kWh/m}^2 / \text{meses}$ , en el invierno no bajan de  $5,5 \text{ kWh/m}^2 / \text{meses}$ , durante el verano (Condori-Yucra, 2010), tomando datos para un  $\beta = 20^\circ$ .

Tabla 1.  
Resumen de datos registrados de irradiación ( $\text{kWh/m}^2$ ) e insolación (Hrs.) (1977-1981)

Meses	Irradiación media anual $\text{kWh/m}^2$	Irradiancia $\text{W/m}^2$	Temperatura promedio de agua de red $^\circ\text{C}$	Temperatura promedio de aire ambiente $^\circ\text{C}$	Insolación Hrs.	Humedad Relativa %
Enero	6.1	1028.4	15.6	15.8	6.1	59.8
Febrero	6.0	901.0	15.8	15.0	6.6	61.4
Marzo	5.7	898.3	15.8	14.5	6.4	63.8
Abril	5.8	694.1	15.8	13.8	8.4	52.0
Mayo	5.5	565.8	14.1	12.8	9.7	42.4
Junio	5.2	532.6	12.5	12.0	9.8	39.6
Julio	5.2	561.4	12.0	12.0	9.3	41.0
Agosto	5.8	609.1	12.1	13.0	9.5	40.4
Setiembre	6.3	692.9	13.3	14.0	9.2	43.2
Octubre	6.6	769.4	14.6	14.8	8.6	46
Noviembre	6.7	842	15.7	15.5	8.1	47.8
Diciembre	6.4	955.9	16.1	15.8	6.8	52.8

Nota. Extraído de Meléndez & Yucra (2005).

Tabla 2.  
Radiación global sobre un plano inclinado ( $\text{kWh m}^{-2} \text{mes}^{-1}$ ) para diferentes ángulos de inclinación ( $\beta$ )

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
$HT(\beta = 0)$	6.7	6.7	6.3	6.3	6.0	5.6	5.6	6.3	7.0	7.0	7.4	6.9
$HT(\beta = 5)$	6.5	6.7	6.4	6.4	6.1	5.7	5.7	6.4	7.0	7.1	7.3	6.8
$HT(\beta = 10)$	6.3	6.6	6.4	6.5	6.2	5.8	5.8	6.5	7.1	7.1	7.1	6.5
$HT(\beta = 15.63)$	6.1	6.4	6.4	6.5	6.3	6.0	5.9	6.5	7.0	7.1	6.8	6.3
$HT(\beta = 20)$	5.9	6.3	6.3	6.5	6.3	6.0	6.0	6.5	7.0	7.1	6.6	6.0
$HT(\beta = 25)$	5.6	6.1	6.3	6.4	6.3	6.1	6.0	6.5	6.9	7.0	6.4	5.7

Nota. Considerar  $a = 0.378$  Albedo (reflectividad del sol)  $0.2$  y  $b = 0.438$ . Extraído de Condori-Yucra (2010).

El estudio tomó en consideración tres secciones para la determinación de los costos de operación por hora, mes y año, y el ahorro anual para una población rural de 385 familias.

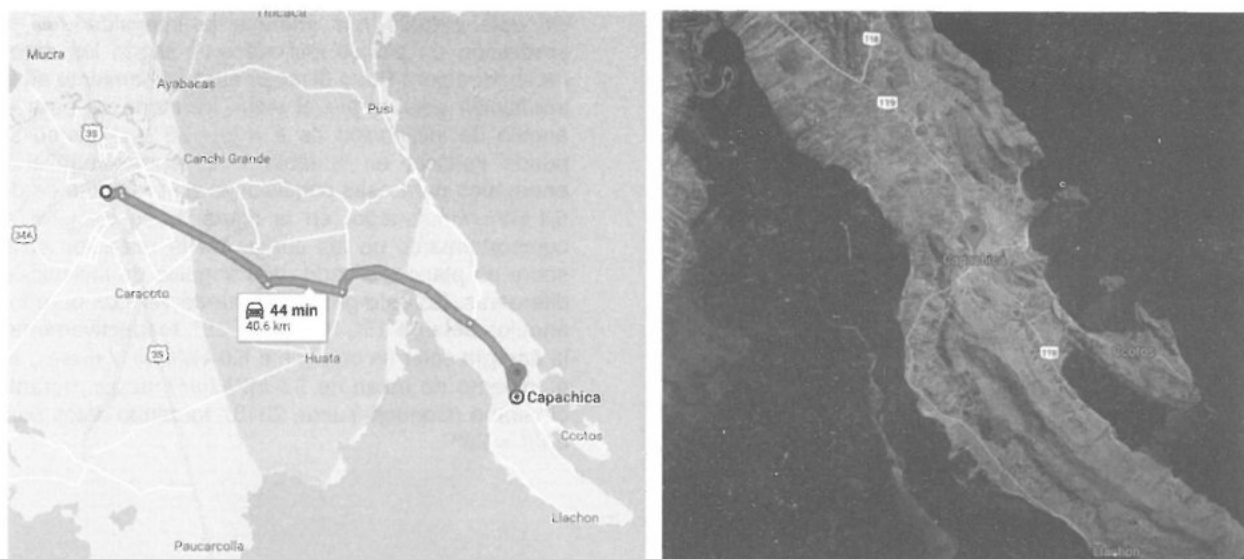


Figura 1. Ubicación del distrito y los sectores donde se realizaron la toma de datos. Las vistas fueron extraídas de Google Maps ([www.google.com/maps/search/Capachica](http://www.google.com/maps/search/Capachica)).

**Línea de Impulsión.** En esta sección se ha de partir con la población actual y con la tasa de crecimiento obtenido de documentos oficiales (INEAI-Puno), determinar la población futura, que será el punto de partida para determinar los parámetros de consumo, dotación, volumen de reservorio y finalmente la determinación de la potencia de extracción.

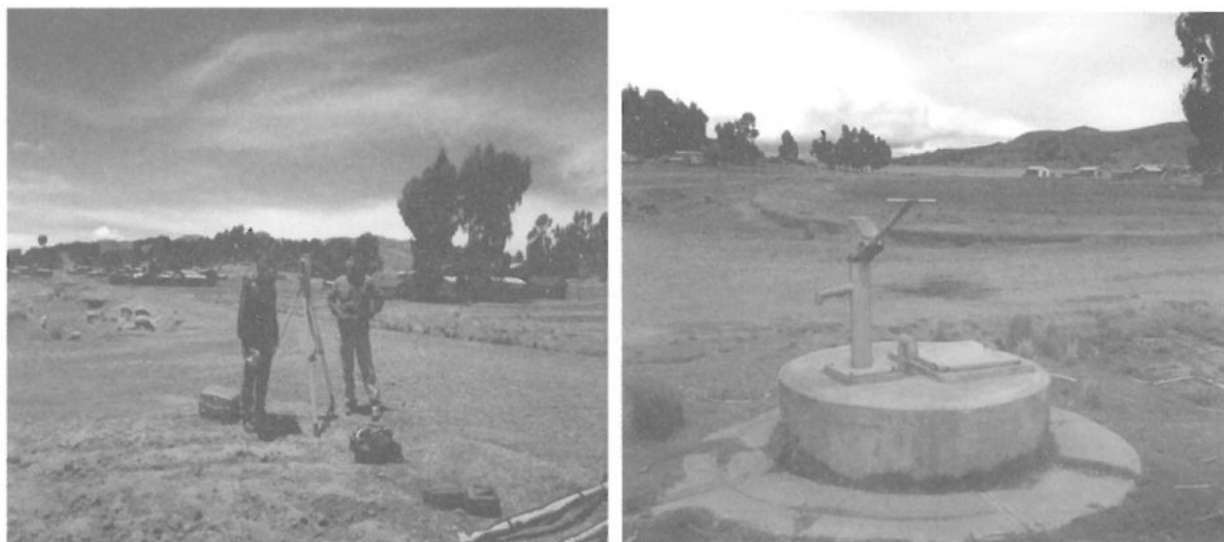


Figura 2. Escenas del reconocimiento de campo para el levantamiento topográfico y vista de extracción manual de agua de pozos existentes utilizados por los pobladores para el consumo de agua.

**Potencia Hidráulica Teórica Diaria Necesaria de la Bomba.** Es necesario conocer el volumen de agua diario medio mensual necesario para satisfacer la demanda de la aplicación. Las diferentes demandas pueden ser: i) agua para consumo humano, ii) agua para consumo de animales domésticos y iii) agua para riego de cultivos (Alonso-Abella & Chenlo-Romero, 2005). Para el bombeo de agua, la demanda energética va estar asociada a dos variables: por un lado, a la demanda de presión del sistema, y por otro lado, a la demanda en caudal propia de la demanda de agua del proceso (Al-Badi & Yousef, 2016), se calculan de la siguiente forma:

$$P_H = \rho g Q H \quad (1)$$

Donde:

$P_H$  : Potencia hidráulica de la bomba en  $[kW]$

$\rho_{H_2O}$  : Densidad del agua en  $[Kg/m^3]$

$Q$  : Caudal en volumen en  $[m^3/seg]$

$H$  : Presión indicada en términos de altura (altura dinámica total) en  $[m]$

*Energía hidráulica diaria necesaria de la bomba.* La energía hidráulica necesaria diaria (Arija-González, 2010), se calcula de la siguiente forma:

$$E_H = \frac{K \cdot Q_d \cdot H_{TE}}{\eta_M} \quad (2)$$

Donde:

$E_H$  : Energía hidráulica necesaria diario en [kWH/día]

$Q_d$  : Caudal requerido de bombeo en [ $m^3/seg$ ]

$H_{TE}$  : Carga dinámica total o altura dinámica total en [m]

$\eta_M$  : Rendimiento del conjunto motor-bomba en [%]

$K$  : Constante de conversión [2,725]

*Consumo Promedio Anual.* El consumo promedio se calcula en función a la población futura y la dotación (OPS, 2005). Generalmente se acepta que el consumo medio diario por persona es de 40 litros/persona/día, aumentando a 100 litros/persona/día en ciudades grandes (Alonso-Abella & Chenlo-Romero, 2005), se calcula de la siguiente forma:

$$Q_P = \frac{P_f \cdot Dot}{86400} \quad (3)$$

Donde:

$Q_P$  : Consumo promedio anual de agua en [l/s]

$Dot$  : Dotación de agua en [l/Hab/día]

*Consumo máximo diario.* Este consumo de agua máximo está dado por un periodo de tiempo (OPS, 2005), y se calculará con la siguiente fórmula:

$$Q_{md} = 1,3 \times Q_P \quad (4)$$

Donde:

$Q_{md}$  : Consumo máximo anual de agua en [l/s]

$Q_P$  : Consumo promedio anual de agua en [l/s]

*Tiempo de Llenado del Reservorio* (OPS, 2005), que se refiere a la duración que demora el reservorio en llenarse.

$$t = \frac{V_{Res}}{Q_{md} \times 3600} \quad (5)$$

Donde:

$t$  : Tiempo de llenado del reservorio en [Hr]

$V_{Res}$  : Volumen del reservorio de agua en [ $m^3$ ]

$Q_P$  : Consumo promedio anual de agua en [ $m^3$ ]

**Potencia de la Electrobomba,** (OPS, 2005)

$$P_b = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75\eta} \quad (6)$$

Donde:

$P_b$  : Potencia de la bomba en [HP]

$\gamma$  : Peso específico del agua en [ $Kgf/m^3$ ]

$H$  : Altura total (m)

$Q$  : Caudal de impulsión de agua en [ $m^3/s$ ]

$\eta$  : Rendimiento o eficiencia de la bomba en [%]

*Dimensionamiento del sistema de generación Fotovoltaica.* Para proceder al dimensionado de un sistema fotovoltaico se necesitan datos medios mensuales de irradiación solar del lugar donde se desee realizar la instalación, ver tabla 1. (Condori-Yucra, 2010).

Es necesario determinar la orientación y el ángulo de inclinación que optimicen la relación entre la energía incidente y la energía hidráulica demandada a lo largo de todo el año. Para ello es necesario estimar la radiación global incidente sobre una superficie a distintos ángulos de inclinación y orientada al sur a partir de los datos de radiación global sobre superficie horizontal (Alonso-Abella & Chenlo-Romero, 2005).

*Potencia Pico De Generación,* (Arija-González, 2010)

$$P_p = \frac{E_h}{\eta_{mb}} \cdot \frac{G_{CEM}}{F_m(1 - \delta(T_c - T_{CEM})) \cdot G_{dm}} \quad (7)$$

Donde:

$P_p$  : Potencia Pico necesaria de generación en [w]

$E_h$  : Energía hidráulica necesaria diario en [Kwh/día]

$\eta_{mb}$  : Rendimiento del conjunto motor-bomba en [%]

$G_{CEM}$  : Radiación solar media diaria (constante solar) en [ $w/m^2$ ]

$F_m$  : Factor de acoplo medio [0.9]

$\delta$  : Coeficiente de variación de la potencia con la temperatura en [ $1/^\circ C$ ]

$T_c$  : Temperatura media diaria de los módulos durante las horas de sol en [ $^\circ C$ ]

$T_{CEM}$  : Temperatura en condiciones estándares de prueba CEM en [ $^\circ C$ ]

$G_{dm}$  : Radiación solar media diaria (mes más desfavorable) en [ $Kwh/m^2$ ]

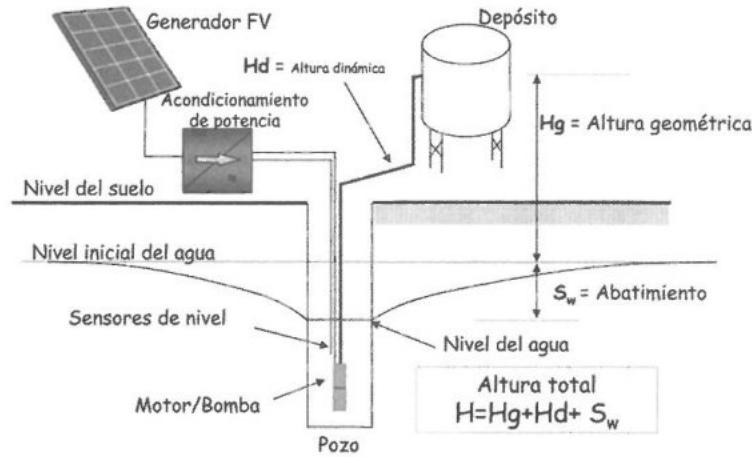


Figura 3. Esquema de la tecnología de bombeo de acuerdo al ciclo hidráulico. Elaborado en base a Alonso-Abella & Chenlo-Romero (2005).

**Costo de operación del sistema.** En este apartado se determina el costo de operación de un sistema si funcionara con energía de la red de sub-distribución secundaria de baja tensión, para una hora, día, mes y anual, y finalmente hacer la estimación para las 385 familias beneficiarias, y con ello determinar el costo de ahorro anual, para eso se emplea la siguientes fórmulas.

Costo de operación por hora.

$$C_{op} = \frac{0.000189 \times Q \times H \times E_{Kwh}}{\eta_b \cdot \eta_m} \quad (8)$$

Donde:

- $Q$  : Caudal en [GPM]
- $H$  : Altura dinámica total en [Pies]
- $E_{Kwh}$  : Costo de la Energía en [S./Kwh]
- $\eta_b$  : Rendimiento medio de la bomba en [%]
- $\eta_m$  : Rendimiento medio del motor en [%]

Costo del ahorro anual

$$S = 0.746HP \cdot L \cdot C \cdot N \cdot \left( \frac{100}{E_b} - \frac{100}{E_a} \right) \quad (9)$$

Donde:

- $S$  : Ahorro anual en [U\$ o S./]
- $HP$  : Potencia del Motor en [HP]
- $L$  : Factor de carga del motor
- $C$  : Tarifa de Energía Eléctrica de BT en [Soles / Kwh]
- $N$  : Tiempo de operación anual en [h]
- $E_b$  : Eficiencia de un motor estándar en [%]
- $E_a$  : Eficiencia de un motor de alta eficiencia MAE en [%]

## Resultados y discusión

### Línea de impulsión

Tabla 3.  
Resultados de cálculo de la línea de impulsión

Parámetro	Valor	Unidad
Población actual (Po)	1,540	hab.
Tasa de Crecimiento (r)	2.51	%
Periodo de Diseño (T)	20	años
Población Futura (PF)	2,312	hab.
Dotación (Dot)	100	l/hab./día
Consumo Promedio Anual (Qp)	2675	l/s
Consumo Máximo Diario (Qmd)	3478	l/s
Volumen del Reservorio	57.79	m <sup>3</sup>
Volumen de Reserva	28.89	m <sup>3</sup>
Volumen del reservorio final	90	m <sup>3</sup>
Desnivel del terreno	72	m <sup>3</sup>
Longitud	487.45	m <sup>3</sup>
Caudal de impulsión Qmd	3478	l/s
Altura del reservorio	4	m
Profundidad del pozo	6	m

Nota. Elaboración propia.

De estos resultados se deduce lo siguiente: el reservorio tiene una capacidad de 90 m<sup>3</sup>, esto indica que abastecerá 20 años, que es conocido como el periodo de diseño, esto significa que hay una población inicial 1,540 hab., y en 20 años habrá una población futura de 2,312 hab., por otro lado, debe indicarse que hay un % de reserva del reservorio que equivale a un 25% del volumen. Esto ayuda a tener días de autonomía con tecnología solar fotovoltaica.

Tabla 4.  
Pérdida de carga total equivalentes en m

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Tramo	PB-RE	
Caudal Qmd	3.478	l/s
Longitud L	487.45	m
Cota de terreno inicial	3,823	m s.n.m.
Cota de terreno final	3,895	m s.n.m.
Desnivel del terreno	72	m
Pérdida de carga unit. Disponible hf	0.1477	m/m
Diámetro D	1,682	pulg.
Diámetro Comerc. Dc	3	pulg.
Velocidad V	0.763	m/s
Pérdida de carga unitaria hf	0.00882	m/m
Pérdida de carga de tramo hf	4299	m
Cota piezométrica inicial	3,908.3	m s.n.m.
Cota piezométrica final	3,905.0	m s.n.m.
ADT - Presión	86.3	m

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5.  
Potencia de electrobomba a utilizar para la tecnología solar

Parámetros	Valor	Unidad de medida
Peso específico del agua	1000	Kgf/m <sup>3</sup>
Caudal de impulsión	0.0035	m <sup>3</sup> /s
Pérdida de carga total	86.299	m
Eficiencia de la bomba	42	%
Potencia de electrobomba	10	HP

Nota. Elaboración propia.

### Dimensionamiento del Sistema de Bombeo Fotovoltaico.

Tabla 6.  
Especificaciones técnicas del panel FV seleccionado

Parámetro	Valor
Potencia pico (Wp)	240.00
Tensión a circuito abierto (Voc)	59.50
Corriente de cortocircuito (Acc)	5.20
Tensión de máxima Potencia (Vmp)	48.90
Intensidad de máxima potencia (Amp)	4.91
Temperatura de trabajo	-40°C a +90°C

Nota. Elaboración propia.

Tabla 7.  
Potencia pico de generación

Parámetros	Valor	Unidad de medida
Energía hidráulica necesaria $E_h$	22.07	$Kwh/día$
Rendimiento del grupo motor bomba	0.42	
Radiación solar media diaria CEM	1000	$w/m^2$
Factor de acoplo medio ( $F_m$ )	0.9	
Coefficiente de variación de la potencia con la temperatura	0.004	$1/°C$
Temperatura media diaria de los módulos durante las horas de sol	40	$°C$
Temperatura en condiciones estándares de prueba CEM	25	$°C$
Radiación solar media diaria en un mes dado (más desfavorable)	5.9	$Kwh/m^2$
Potencia pico de generación con tecnología solar fotovoltaica	11.14	$Kw$

Nota. Elaboración propia.

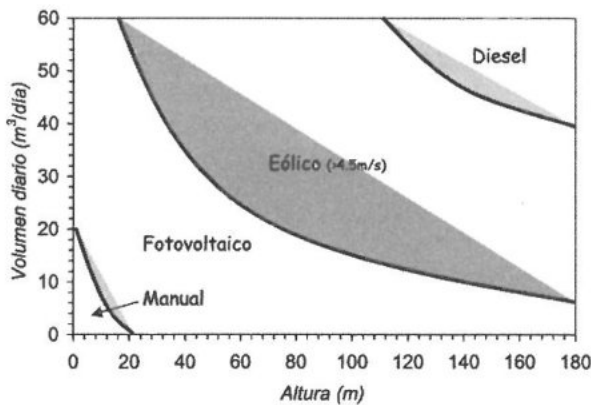


Figura 4. Gráfico indicativo de selección de la tecnología más apropiada de acuerdo al volumen diario y profundidad de bombeo. Extraído de Alonso-Abella & Chenlo-Romero (2005).

Costo de ahorro mensual para las 385 familias beneficiarias (S), considerando un tipo de cambio de U\$ 1.0 = 3.32 soles.

Tabla 10.  
Costos de operación y ahorro anual si fuera convencional

Número de horas	Op. por día U\$	Op. anual U\$	Ahorro anual U\$
2	2887.50	313,191	16,690
4	5775.00	626,382	33,381
6	8666.35	939,572	50,071
8	11553.85	1,252,763	66,761
10	14441.35	1,565,954	83,452
12	17328.85	1,879,145	100,142

Nota. Elaboración propia.

Tabla 8.  
Número total de Paneles FV del que ocupara 20m<sup>2</sup> de área

Parámetro	Valor
Número Paneles FV en serie	8
Número Paneles FV en paralelo	6
Número Paneles FV Total	48

Nota. Elaboración propia.

### Análisis del costo de operación del sistema si fuera convencional

Si el caudal es de 0.00456 m<sup>3</sup>/s, y la bomba trabaja 6.0 h/día, 180 h/mes y 365 días/año, el volumen bombeado será de: 2160 h/año. Eligiendo la tarifa BT5B (una sola energía activa), en baja tensión de la red pública, siendo el  $Kwh$  mensual de 0.6323 soles/ $Kwh$ , (Fuente: Tarifa actualizada a enero 2019 de Electro Puno S.A.A.)

Tabla 9.  
Datos de partida para el cálculo del sistema si fuera convencional

Parámetros	Valor	Unidad de medida
Población	385	$fam.$
HDT	90	$m$
Ef. Bomba (Eb)	80%	$%$
Ef. Motor	85%	$%$
Caudal (Q)	0.00456	$m^3/s$
Volumen	90	$m^3$
Potencia	10	$HP$
Factor de carga del motor (L)	0.8	-
Eficiencia de un MAF (Ea)	95	$%$

Nota. Elaboración propia.  
%/ Convencional.



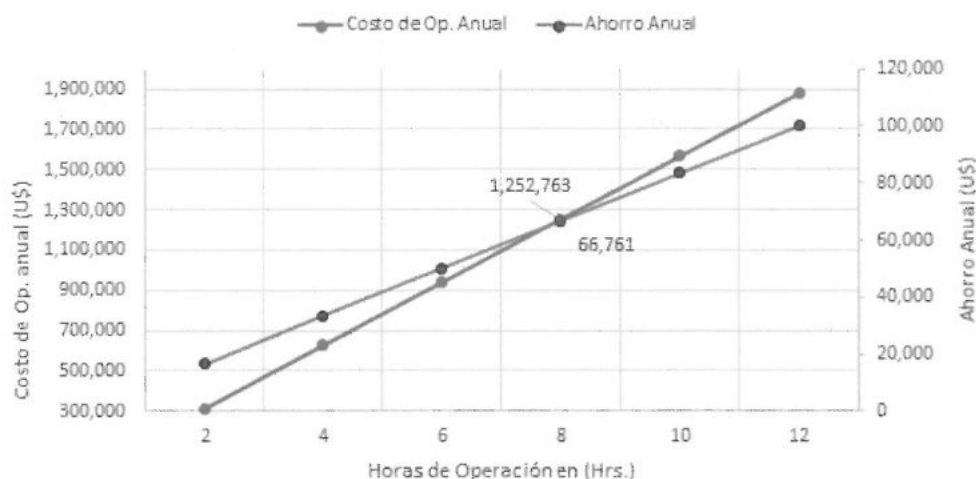


Figura 5. Costo por el número de horas de operación y el ahorro anual en (US\$). Elaboración propia.

Esta figura 5, considerando un sistema convencional, nos ilustra un comportamiento lineal entre las horas de operación y el ahorro obtenido durante un año, la intersección entre ambas rectas corresponde a 8 h, de operación por día, que sería el adecuado, como puede apreciarse el número de horas de operación es constante durante todo el año.

Tabla 11.  
Costos de operación y ahorro mensual si fuera convencional

Meses	Número de días	Número de horas de operación/mes	Costo de operación mensual (US\$)	Ahorro mensual (US\$)
Enero	31	186	210.00	956.00
Febrero	28	168	190.00	863.00
Marzo	30	180	203.00	925.00
Abril	30	180	203.00	925.00
Mayo	31	186	210.00	956.00
Junio	30	180	203.00	925.00
Julio	31	186	210.00	956.00
Agosto	31	186	210.00	956.00
Setiembre	30	180	203.00	925.00
Octubre	31	186	210.00	956.00
Noviembre	30	180	203.00	925.00
Diciembre	31	186	210.00	956.00
Ahorro anual				11,224.00

Nota. Elaboración propia.

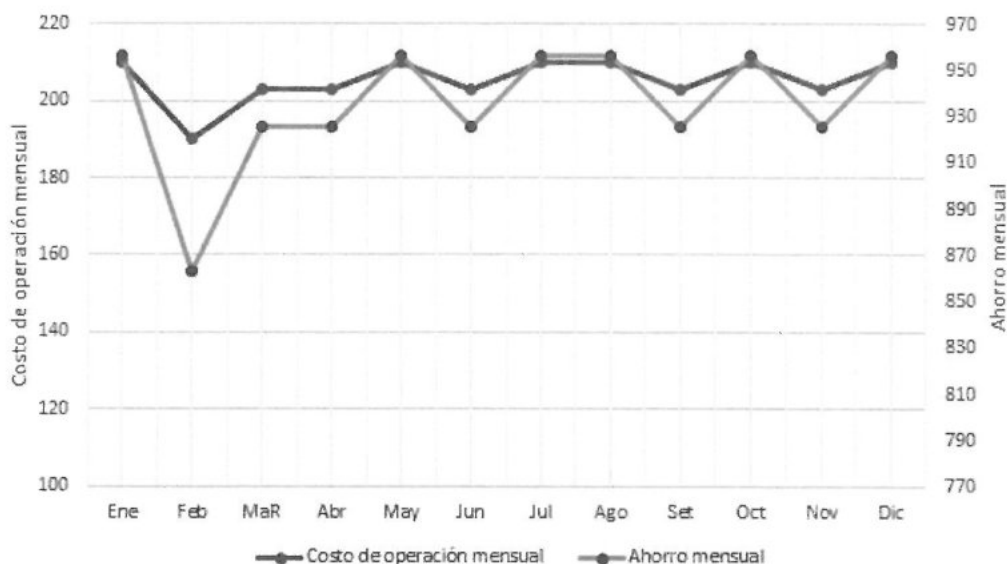


Figura 6. Costo por el número de horas de operación y el ahorro anual en (U\$). Elaboración propia.

En este grafico apreciamos que el ahorro mensual va de la mano con el costo de operación evidenciando que en un sistema convencional las horas de operación son constantes durante el día.

Tomando en cuenta la figura 7, nos hace ver que la tecnología solar tiende a comportarse de manera constante, mientras que otro tipo de tecnología como es el caso del diésel se ve un crecimiento a lo largo de los años.

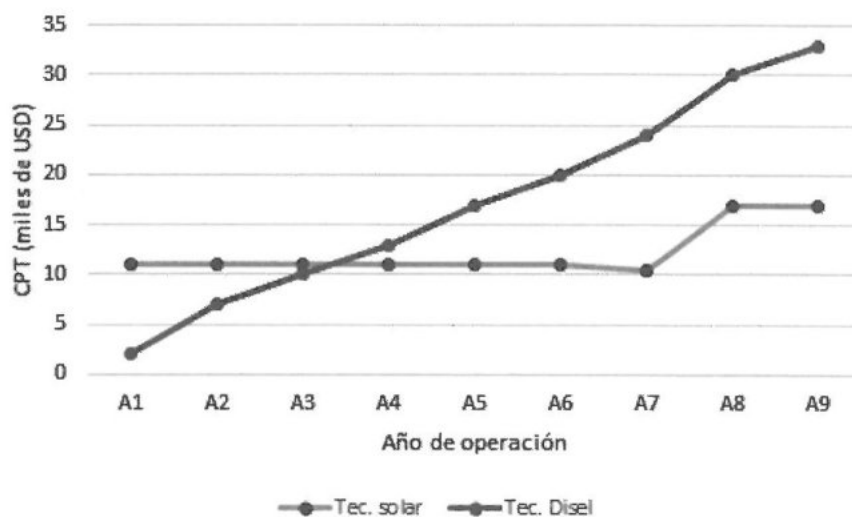


Figura 7. Comparación a largo plazo de costo de operación con sistema FV y convencional. Elaborado en base a Figueroa & Loard (2014).

En tal sentido podemos afirmar que la población de las comunidades en el caso de estudio, no están en condiciones de pagar el costo del servicio de agua potable, en vista de que el costo de operación tiende a subir durante los años, agregándose el costo del mantenimiento que crecería anualmente y esto demuestra que la tecnología convencional no es sostenible en el tiempo.

### Análisis del Costo de operación del sistema si fuera renovable

Tabla 12.  
Costos de operación y ahorro mensual con energía renovable

Meses	Número de días	Insolación en horas <i>h</i>	Irradiación <i>Kwh/m<sup>2</sup></i>	Número de horas op./mes <i>h</i>	Costo de operación mensual <i>U\$</i>	Ahorro mensual <i>U\$</i>
Enero	31	6.1	5.9	189	214.00	971.00
Febrero	28	6.6	6.3	185	209.00	949.00
Marzo	30	6.4	6.3	192	217.00	986.00
Abril	30	8.4	6.5	252	285.00	1,295.00
Mayo	31	9.7	6.3	301	340.00	1,545.00
Junio	30	9.8	6.0	294	332.00	1,510.00
Julio	31	9.3	6.0	288	326.00	1,481.00
Agosto	31	9.5	6.5	295	333.00	1,513.00
Setiembre	30	9.2	7.0	276	312.00	1,418.00
Octubre	31	8.6	7.1	267	301.00	1,370.00
Noviembre	30	8.1	6.6	243	275.00	1,248.00
Diciembre	31	6.8	6.0	211	238.00	1,083.00
Ahorro anual						15,369.00

Nota. Elaboración propia.

La tabla 12, indica que, en un escenario donde se utiliza la tecnología solar como fuente de energía, las horas de operación no son constantes, están dadas de acuerdo al número de horas por día, esto se ve en la columna de datos sobre insolación para cada mes, donde la horas de bombeo estarán directamente relacionadas con ese parámetro y con el ahorro que generaría podría financiarse un sistema con tecnología solar que sumaría alrededor de 27,688.00 U\$ (ver tabla 13.)

En la figura 8, se aprecia que el comportamiento de los costos de operación mensual tiende a mostrarse constante y el ahorro mensual tiende a su crecimiento, según la variación de horas de sol durante el día.

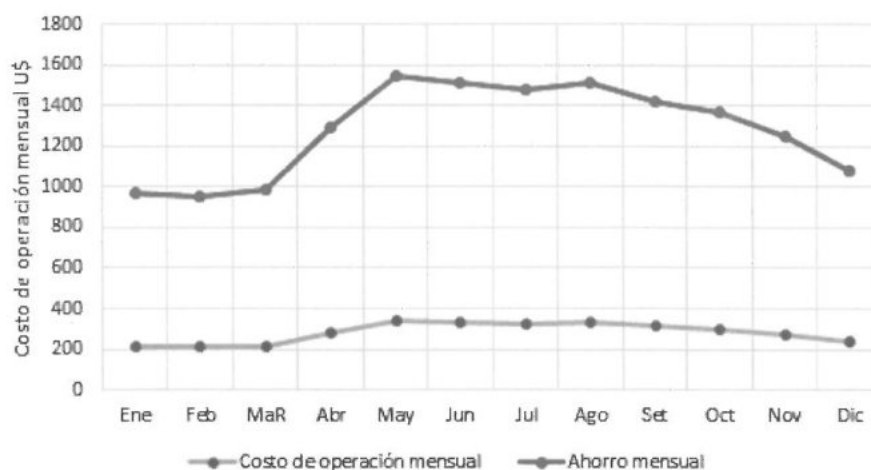


Figura 8. Costo por el número de horas de operación y el ahorro anual con tecnología solar en (U\$). Elaboración propia.

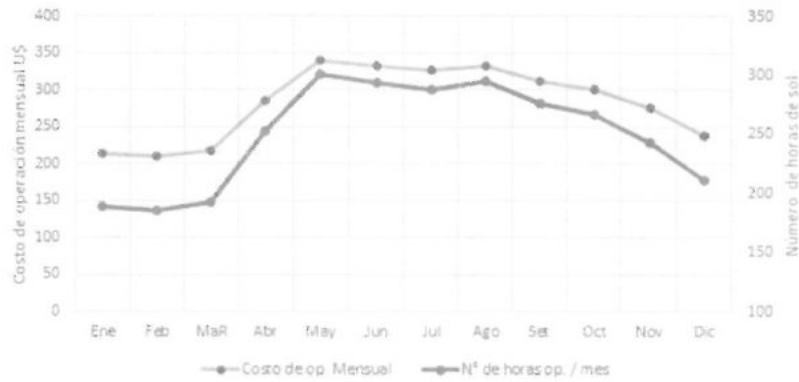


Figura 9. Costo por el número de horas de operación y el ahorro anual en (US\$). Elaboración propia.

La figura 9 indica que, según la variación de las horas de sol, los costos de operación siguen el mismo comportamiento, en realidad mucho depende de las horas de operación y esto a su vez de las horas de sol.

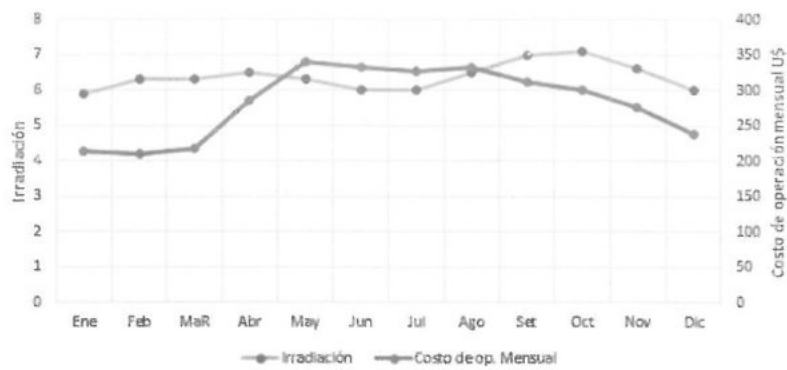


Figura 10. Costo por el número de horas de operación y el ahorro anual en (US\$). Elaboración propia.

Tabla 13.  
Inversión de un Sistema de bombeo PV

Descripción	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Precio unitario (US\$)	Valor total (US\$)
<i>Costos directos</i>				
Panel solar celda monocristalina INTIPOWER 12WP-12V	52	-	186.00	9,672.00
Sensor contra marcha en vacío	1	-	95.00	95.00
Bomba Lorentz PS400 C-SJ17-4+Controlador	1	-	6,384.00	6,384.00
Interruptor de protección PV Disconnect	1	-	650.00	650.00
Sensor de irradiación solar SunSwitch Lorentz	1	-	314.00	314.00
Tubería C10 de 4" x 1.5 Km	1	-	7,944.00	7,944.00
Accesorios eléctricos	1	-	600.00	600.00
Accesorios hidráulicos	1	-	300.00	300.00
<i>Costos Indirectos</i>				
transporte de materiales	1	800.00	243.00	243.00
Costos de instalación	1	-	1,000.00	1,000.00
Soporte de paneles	1	800.00	243.00	243.00
Columnas de madera natural	1	800.00	243.00	243.00
<b>Total inversión</b>				<b>27,688.00</b>

Nota. Elaborado en base a Peralta-Vera (2018).

## Conclusiones

La contrastación del uso de tecnología convencional (ahorro de U\$ 11,220.00) frente a la tecnología fotovoltaica (ahorro de U\$ 15,370.00) para la extracción de agua permite verificar que efectivamente existe un impacto económico favorable cuando se opta por las tecnologías limpias y sostenibles como es el caso de los sistemas de bombeo fotovoltaico. Se trata de una tecnología confiable y sostenible en el tiempo, además de no requerir almacenamiento de energía (acumuladores), sino en cambio un porcentaje de almacenamiento hidráulico en los reservorios. Además, la población usuaria, familias que no acceden al servicio de agua potable, no asumiría la responsabilidad del coste elevado de operación de un sistema de bombeo convencional.

Referencias bibliográficas

- Ab'Sáber, A. N. (1999). Sertões e sertanejos: uma geografia humana sofrida. *Dossiê Nordeste Seco: Estudos Avançados*, 13(36), 5–59. <https://doi.org/10.1590/S0103-40141999000200002>
- Al-Badi, A., & Yousef, H. (2016). Design of Photovoltaic Water Pumping System as an Alternative to Grid Network in Oman. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 11–16. <https://doi.org/10.24084/repqj14.203>
- Alonso-Abella, M., & Chenlo-Romero, F. (2005). *Sistemas de Bombeo Fotovoltaico*. Madrid - España. Disponible en: [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45334/componente45332.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45334/componente45332.pdf)
- Arija-González, D. (2010). Prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de cooperación al desarrollo con tecnologías apropiadas. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior. Disponible en: [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10871/PROYECTO fina. David Arija Gonzalez.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10871/PROYECTO%20final%20David%20Arija%20Gonzalez.pdf)
- CEPLAN. (2017). Información departamental, provincial y distrital de población que requiere atención adicional y devengado per cápita - Perú. Lima - Perú: Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. Disponible en: <https://www.ceplan.gob.pe/wp-content/uploads/2017/08/Matriz-de-indicadores-nacionales-a-Julio-de-2017.pdf>
- Cerdán-Cabrera, A. M. (2011). Diseño de un sistema de bombeo solar-eólico para consumo de agua en las cabañas ecoturísticas en La Pitaya (Veracruz, México). Universidad Internacional de Andalucía. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10334/1468>
- Condori-Yucra, R. (2010). Estudio para la climatización de la piscina y la producción de agua caliente sanitaria ACS con energía solar de la UNAP. Cusco - Perú: IV Conferencia Latinoamericana de Energía Solar (IV ISES\_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar. Disponible en: <https://docplayer.es/7039487-Estudio-para-la-climatizacion-de-la-piscina-y-la-produccion-de-agua-caliente-sanitaria-acs-con-energia-solar-de-la-unap.html>
- Figueroa, E., & Loard, M. (2014). El auge de la energía solar fotovoltaica en sistemas de riego. In XXI Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXI- SPES) (pp. 20–15). Piura - Perú. Disponible en: <https://docplayer.es/6175037-El-auge-de-la-energia-solar-fotovoltaica-en-sistemas-de-riego.html>
- Katsiri, A. (2009). Public Water Supply and Access To Improved Water Sources. Athens - Greece. Disponible en: [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0004/96943/1.2.-Access-to-improved-water-sources-EDITED\\_layouted\\_V3.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/96943/1.2.-Access-to-improved-water-sources-EDITED_layouted_V3.pdf?ua=1)
- Meléndez, T. A., & Yucra, R. C. (2005). Diseño y Construcción de un Colector Tipo CPC para un Módulo Experimental de Calentamiento de Agua con Energía Solar. Puno - Perú: Editorial Universitaria UNA-PUNO. Disponible en: <https://www.escavador.com/sobre/596105/tedd-y-arturo-flores-melendez>
- OPS. (2005). Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable. Organización Panamericana de La Salud. Lima - Perú: Organización Panamericana de la Salud. <https://doi.org/10.1159/000112599>
- Ortiz-Ortiz, J. P., & Aldana, D. M. (2013). Dimensionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico para una zona rural de Piura, Perú. In XX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XX -SPES) (pp. 11 –15). Tacna: Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería - Programa académico de Ingeniería Mecánico Eléctrica. Disponible en: <http://docplayer.es/21296732-Dimensionamiento-de-un-sistema-de-bombeo-fotovoltaico-para-una-zona-rural-de-piura-peru.html>
- Peralta-Vera, A. A. (2018). Estudio experimental de un sistema de bombeo solar fotovoltaico en corriente continua. Universidad Tecnológica del Perú. Disponible en: [http://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/UTP/1132/1/Aixa\\_Peralta\\_Trabajo\\_de\\_Investigacion\\_Bachillerato\\_2018.pdf](http://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/UTP/1132/1/Aixa_Peralta_Trabajo_de_Investigacion_Bachillerato_2018.pdf)
- PNUD. (2006). RESUMO Relatório do Desenvolvimento Humano 2006. A água para lá da escassez: poder, pobreza e a crise mundial da água. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. New York - USA: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Disponible en: [http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2006\\_portuguese\\_summary.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2006_portuguese_summary.pdf)
- Rodriguez, C., Herrera, R., Kiskia, M., Iriarte, A., & Fabris, A. (2000). Bombeo fotovoltaico: un análisis técnico-social de instalaciones en la provincia de Catamarca. Argentina. Disponible en: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2000/2000-t004-a002.pdf>
- Valer, R., Moura de Moraes, A., Morante, F., Zilles, R., & Fedrizzi, M. C. (2014). Desafíos actuales para la difusión de sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua en el semiárido brasileño: observaciones de campo. Acta de La XXXVII Reunión de Trabajo de La Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, 2, 93–100. Disponible en: [https://www.academia.edu/16824033/DESAFIOS\\_ACTUALES\\_PARA\\_LA\\_DIFUSIÓN\\_DE\\_SISTEMAS\\_FOTOVOLTAICOS\\_DE\\_BOMBEO\\_DE\\_AGUA\\_EN\\_EL\\_SEMIÁRIDO\\_BRASILEÑO\\_OBSERVACIONES\\_DE\\_CAMPO](https://www.academia.edu/16824033/DESAFIOS_ACTUALES_PARA_LA_DIFUSIÓN_DE_SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS_DE_BOMBEO_DE_AGUA_EN_EL_SEMIÁRIDO_BRASILEÑO_OBSERVACIONES_DE_CAMPO)