

Simulación de Sistema de bombeo fotovoltaico para Campo Alegre y Ripialito en Vichada.

Juan Manuel Carabalí¹

juan.carabali03@usc.edu.co

David Medina Núñez¹

david.medina00@usc.edu.co

Alejandro Paz Parra²

alejandropaz00@usc.edu.co

**Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería en Energías (1)
Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería en Energías. Grupo de
investigación Grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica Industrial y Ambiental GIEIAM (2)**

Resumen.

Muchas comunidades rurales en Colombia dependen de motobombas de gasolina para extraer agua de pozos profundos para la agricultura o para uso diario debido a la falta de electricidad; esto resulta costoso y ambientalmente perjudicial. En el presente artículo se presenta un estudio de caso de una comunidad rural a la cual se le propone solucionar su dependencia de los combustibles fósiles mediante una solución de bombeo solar fotovoltaico.

El enfoque del estudio es el resguardo indígena de Campo Alegre y Ripialito, que se encuentra en una zona rural de Colombia con escaso acceso a electricidad y servicios básicos. La comunidad, compuesta por seis familias y 29 habitantes, depende principalmente de actividades agrícolas y ganaderas para su subsistencia. A pesar de que el 98.6% del país cuenta con electricidad, solo el 14.1% de esta comunidad la tiene, lo cual impacta de manera negativa su desarrollo socioeconómico (Cabrales & Delgado, 2019). El estudio consistió en analizar las necesidades de agua de la comunidad y la fuente de donde se extrae el recurso para proponer una solución ambientalmente sostenible que además proporcione una solución al problema del acceso al agua. Se utiliza el software de simulación PVsyst para simular el rendimiento del sistema solar y calcular el beneficio económico y ambiental obtenido con la solución. Este proyecto tiene como objetivo mejorar la independencia energética y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, así como cerrar la brecha en el acceso a servicios básicos y fomentar el desarrollo sostenible en la comunidad analizada.

Palabras Clave: Electrificación rural, comunidades indígenas, sistemas fotovoltaicos, bombeo solar.

Abstract

Many rural communities in Colombia rely on gasoline-powered pumps to extract water from deep wells for agriculture or daily use to a lack of electricity; this is costly and environmentally harmful. This article presents a case study of a rural community proposed to solve its dependency on fossil fuels through a photovoltaic solar pumping solution. The focus of the study is the indigenous reserve of Campo Alegre and Ripialito, located in a rural area of Colombia with limited access to electricity and basic services. The community, composed of six families and 29 inhabitants, primarily depends on agricultural and livestock activities for survival. Despite 98.6% of the country having electricity, only 14.1% of this community, negatively impacting its socioeconomic development (Cabrales & Delgado, 2019). The study involved analyzing the community's water needs and the source from which the resource is extracted to propose an environmentally sustainable solution that also addresses the water access problem. PVsyst simulation software is used to simulate the performance of the solar system and calculate the economic and environmental benefits obtained with the solution. This project aims to enhance energy independence, reduce greenhouse gas emissions, close the gap in access to basic services, and promote sustainable development in the studied community.

Keywords: Rural electrification, indigenous communities, photovoltaic systems, solar pumping.

1. INTRODUCCIÓN

En áreas rurales remotas, la falta de acceso a sistemas de energía eléctrica limita significativamente las oportunidades de desarrollo económico y social (Fernández Barón, 2019). A pesar de los avances en la cobertura de servicios públicos en Colombia, incluyendo el suministro eléctrico el cual pasó de un 93.8% en 1997 al 98.6% en 2022 en Colombia, aún existen brechas significativas que mantienen a un número importante de hogares sin servicio de electricidad o con prestaciones deficientes (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2018). La cobertura ha mejorado, las áreas rurales aún enfrentan dificultades para acceder a servicios básicos como la energía eléctrica (Cabrales & Delgado, 2019), y cerca de 500,000 hogares carecen de acceso a este servicio. Para abordar esta desigualdad, se han establecido dos subsistemas: el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y Zonas No Interconectadas (ZNI), según la Ley 855 de 2003. Las ZNI, principalmente áreas rurales, enfrentan obstáculos significativos para el desarrollo debido a la falta de acceso y calidad deficiente del suministro eléctrico (Hernán Flórez Acosta et al., 2009).

El estudio se centra en Campo Alegre y Ripialito, organizada bajo la estructura de resguardo según la Ley 89 de 1890 (Congreso de la República de Colombia, 1890). Situadas en las coordenadas 6.02° latitud y -69.71° longitud. Según datos de (NASA POWER, 2024), esta área experimenta un promedio anual de 4.99 horas de luz solar máxima, variando entre 5.97 y 4.04 horas en los últimos 20 años. La precipitación anual es inferior a 1500 mm, y el clima es cálido, con temperaturas medias superiores a 25°C. El brillo solar es más intenso en enero (232.7 horas) y diciembre (211 horas), disminuyendo en junio (104 horas). (IDEAM, 2022).

De acuerdo con el Censo Nacional de Población y Vivienda de 2018, realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el resguardo indígena está compuesto por 6 familias y 29 habitantes, quienes mantienen un estilo de vida tradicional y una estrecha conexión con la tierra (DANE, 2019). Las actividades agrícolas y ganaderas son la columna vertebral de su economía, destacándose cultivos como caña de azúcar, cacay, plátano, yuca brava, ñame, frijol, batata, mapuey, cacao y piña. Además, cultivan frutales cerca de sus viviendas, como guama, mango, cítricos, papaya y plantas medicinales, que son importantes fuentes de ingresos y parte integral de su identidad y sustento (Trujillo et al., 2023).

El servicio con mayor cobertura en las viviendas es la electricidad; sin embargo, solo el 14.1% de las viviendas de la comunidad tiene energía eléctrica, frente al 98.6% a nivel nacional. Los servicios de electricidad y acueducto tienen rezagos significativos, con diferencias de 82.0 y 76.9 puntos porcentuales respecto al promedio nacional. Además, solo el 0.8% de la población tiene acceso a internet en sus viviendas. (IPSE, 2024).

En una comunicación telefónica, Jaideir Camacho, líder indígena del resguardo de Campo Alegre y Ripialito, destacó la falta de acceso a la energía eléctrica en su comunidad, lo que ha obligado a adoptar soluciones costosas y poco sostenibles, como el uso de motobombas alimentadas por gasolina. Actualmente, el agua se extrae de un pozo de 25 metros de profundidad mediante una motobomba de 6,5 HP y 3600 rpm, que consume 1 galón de gasolina por cada hora de funcionamiento. El agua bombeada se almacena en tinajas para su uso posterior. El consumo diario de combustible es de aproximadamente 1 galón para actividades agrícolas y consumo humano, pero aumenta a 2 galones con el consumo ganadero, pero el costo del galón de gasolina es considerablemente mayor al precio de venta nacional en estaciones de servicio debido al aislamiento de la comunidad y el costo agregado del transporte de combustible desde el centro urbano más cercano. Esta situación resalta la necesidad de alternativas energéticas más eficientes, económicas y sostenibles para mejorar la calidad de vida en de Campo Alegre y Ripialito.

El alto costo del galón de gasolina en la región se encuentra aproximadamente en \$28,000 pesos colombianos, y la distancia que los separa del casco urbano imponen una carga financiera considerable para obtener el combustible, lo cual resulta en el uso intermitente de la motobomba para ahorrar combustible y priorizar otras necesidades; esta situación se convierte en un problema que limita las posibilidades de expandir la actividad económica principal de la comunidad. Se ha considerado la ampliación de la cobertura de la red eléctrica al Sistema Interconectado Nacional (SIN), pero esta opción se ha descartado debido a los altos costos y la complejidad geográfica y dispersión poblacional (Raúl & Revelo, 2018).

En este contexto, la energía solar emerge como una alternativa viable y rápida para la electrificación de la comunidad. Aunque la motobomba a gasolina desempeña un papel importante en la captación de agua en la comunidad, representa un punto de vulnerabilidad debido a su dependencia de combustibles fósiles.

Los sistemas de bombeo solar, por el contrario, ofrecen una mejora considerable en eficiencia, sostenibilidad y acceso a energía limpia para la comunidad (Juan Daniel Rivas Casarrubia, 2020).

Es evidente la necesidad de alternativas que reduzcan esta dependencia y mitiguen los impactos ambientales asociados, especialmente en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (G. Hernández, 2021).

En este estudio se realiza el análisis técnico y económico de un sistema de bombeo solar basado en simulaciones como alternativa al proceso actual. Este enfoque busca lograr la independencia energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la comunidad y contribuir a cerrar la brecha en el acceso a la energía eléctrica, promoviendo así el desarrollo sostenible de esta comunidad.

2. METODOLOGÍA

El proyecto examinó comunidades en zonas no interconectadas, enfocándose en aquellas donde la ausencia de electricidad restringe notablemente su crecimiento económico, con el objetivo de evaluar su estado energético y socioeconómico.

La investigación destaca la dependencia de combustibles fósiles para el bombeo de agua en comunidades rurales aisladas como un obstáculo al desarrollo. Debido a su alta complejidad y costo, se propone explorar sistemas de bombeo solar como alternativa sostenible y económica para mejorar el avance de estas áreas.

2.1 Recopilación de datos

De acuerdo con Muñoz-Arias et al., 2021, en la fase inicial se investigó la cobertura eléctrica en las ZNI en Colombia, incluyendo el análisis de la legislación vigente y la evaluación de ejercicios de planificación anteriores. También se evaluaron aspectos relacionados con la cobertura de servicios públicos como agua potable y alcantarillado, así como el acceso al agua para consumo humano y agrícola, el nivel de escolaridad y el índice de pobreza multidimensional.

2.2 Selección de zona y estudio de casos

El proceso de selección implicó definir criterios, evaluar recursos naturales, geografía y demanda energética, utilizando una matriz basada en índices de pobreza, acceso a salud, agua y servicios públicos, además del potencial solar. Se identificaron 10 sitios candidatos en diversos departamentos para determinar el lugar de estudio (M. F. Hernández et al., 2018).

2.3 Identificación de la necesidad puntual

Se enfocó en simular un sistema de bombeo solar como alternativa a las motobombas de combustible fósil, buscando independencia energética, disminuir emisiones de CO₂ y mejorar el acceso a electricidad en la comunidad objeto de estudio. (Colmenares-Quintero et al., 2021).

2.4 Caracterización de la demanda de H₂O

Para el diseño de un sistema de bombeo solar, se estimó la demanda diaria de agua para riego, basándose en el caudal actual y el consumo semanal de 10 galones de gasolina, siguiendo metodologías de estudios anteriores (Melo Vega et al., 2022).

2.4.1 Diseño de tanque de almacenamiento de H₂O.

Se eligió un tanque de almacenamiento para satisfacer las necesidades de agua en Campo Alegre y Ripialito, asegurando suministro durante el día (Gerardo et al., 2024).

2.4.2 Cálculo de Potencia hidráulica necesaria

Se calculó la demanda diaria de agua para uso agrícola y humano basándose en Gerardo et al., 2024, utilizando la ecuación de potencia hidráulica como metodología para diseñar un sistema de bombeo solar.

$$P_h = \rho * g * Q * H_t \text{ Ecuación (1)}$$

Dónde: P_h = Potencia hidráulica, ρ = Densidad agua $\left(1000 \frac{Kg}{m^3}\right)$

g = Gravedad $\left(9,81 \frac{m^2}{s}\right)$, Q = Caudal $\left(\frac{m^3}{s}\right)$; H_t = (profundidad pozo + altura tanque).

2.4.3 Selección de tipo de bomba

Se selecciona la motobomba adecuada basándose en parámetros específicos de la zona.

2.4.4 Calculo de potencia de bomba eléctrica

Se determinó el rendimiento de la bomba necesario para el cálculo de la demanda de energía eléctrica. Con estos datos, se calculó la potencia eléctrica necesaria en vatios para el motor de la motobomba.

2.5 Selección del inversor

La selección de un inversor solar implica evaluar la capacidad de potencia necesaria, compatibilidad con módulos solares y requisitos específicos del sistema. Se recomienda revisar estudios como el de Avila et al., 2015.

2.6 Cálculo de la energía eléctrica para el bombeo solar

Es fundamental conocer la energía eléctrica requerida por el sistema antes de dimensionar la potencia fotovoltaica necesaria para la carga usando la siguiente ecuación (Adrian Gil Hueso, n.d.).

$$E_e = \frac{P_e * t}{\eta_{inv}} \text{ Ecuación (2)}$$

Dónde: E_e = Energía eléctrica, P_e = Potencia eléctrica bomba,

t = tiempo operación, η_{inv} = eficiencia inversor.

2.7 Dimensionamiento Solar fotovoltaico

Para evaluar el recurso se utilizan herramientas como NASA, IDEAM y PVsyst. Siguiendo a Hoyos et al., 2019 y Camacho et al., 2021, se selecciona el escenario con la menor radiación solar promedio mensual durante los últimos 20 años.

$$N = \frac{(E_e * 1,2)}{(HSP)(W_{panel})(Eficiencia)} \text{ Ecuación (3)}$$

Dónde : N = Número de módulos, E_e = Energía Eléctrica bomba solar,

HSP = Horas Sol Pico, W_{panel} = Potencia módulo solar

2.7.1 Arreglo fotovoltaico de los módulos

Siguiendo a Camilo Fuentes Amín & Esteban Romero Torres, 2020, los módulos se organizan en arreglos en serie para satisfacer los criterios del inversor elegido.

2.7.2 Selección del banco de baterías

Gina Rodríguez - Borges & Sarmiento - Sera, 2011. Exponen que estos cálculos se llevan a cabo teniendo en cuenta la demanda energética, la disponibilidad de radiación solar, la capacidad de almacenamiento requerida y la eficiencia de las baterías.

$$CapBat = \frac{E_e}{(DOD * Ub)} \text{ Ecuación (4)}$$

Dónde: CapBat = capacidad baterías Amperios hora, E_e = Energía eléctrica bombeo solar,

DOD = Profundidad de descarga, Ub = Voltaje de trabajo

2.8 Simulación del sistema de suministro energético

La simulación del sistema de suministro energético buscaba encontrar la configuración ideal para el bombeo solar. Se eligieron herramientas computacionales. Entre las recomendadas en la literatura, PVsyst destaca por facilitar análisis técnicos y ofrecer detalles sobre los componentes requeridos (Camacho et al., 2021).

2.9 Beneficio Ambiental y económico

Se recopiló información precisa sobre el consumo de combustible, su valor y las emisiones de CO₂e, comparándolas con un sistema de bombeo solar. Esto permitió evaluar la reducción potencial de emisiones (Toro et al., 2014). Además, se analizó el flujo de caja a 20 años con una tasa de descuento del 10% para el PSFV, considerando su vida útil de 20 años frente a 5 años para la bomba y el controlador.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Recopilación de datos

En la recopilación de datos, se consultaron bases de datos que ofrecen acceso a artículos de investigación. Por ejemplo, se incluyó el artículo de Galindo et al., 2017, sobre el uso de la energía solar como alternativa sostenible para los sistemas de bombeo de agua en zonas rurales de Colombia. En el contexto de la transición energética justa en el país, se destacó la Ley 2294 de 2023, que expide el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, denominado “COLOMBIA POTENCIA MUNDIAL DE LA VIDA”. Esta ley adiciona el numeral 25 al artículo 5 de la Ley 1715 de 2014, reglamentando a las comunidades energéticas y fomentando el uso de fuentes de energía renovable, como la solar, para reducir la dependencia de combustibles fósiles (El Congreso de Colombia, 2023). La ONU, en su Objetivo 7, pretende garantizar el acceso a una energía limpia y asequible, esencial para el desarrollo de la agricultura, las empresas, las comunicaciones, la educación, la sanidad y el transporte (Naciones Unidas, n.d.).

3.2 Selección de zona y estudio de casos

Se creó una matriz de selección basada en el potencial energético, la pobreza multidimensional, el acceso a energía eléctrica, servicios de salud, logros educativos y horas de sol pico en las Zonas No Interconectadas (ZNI). Este método

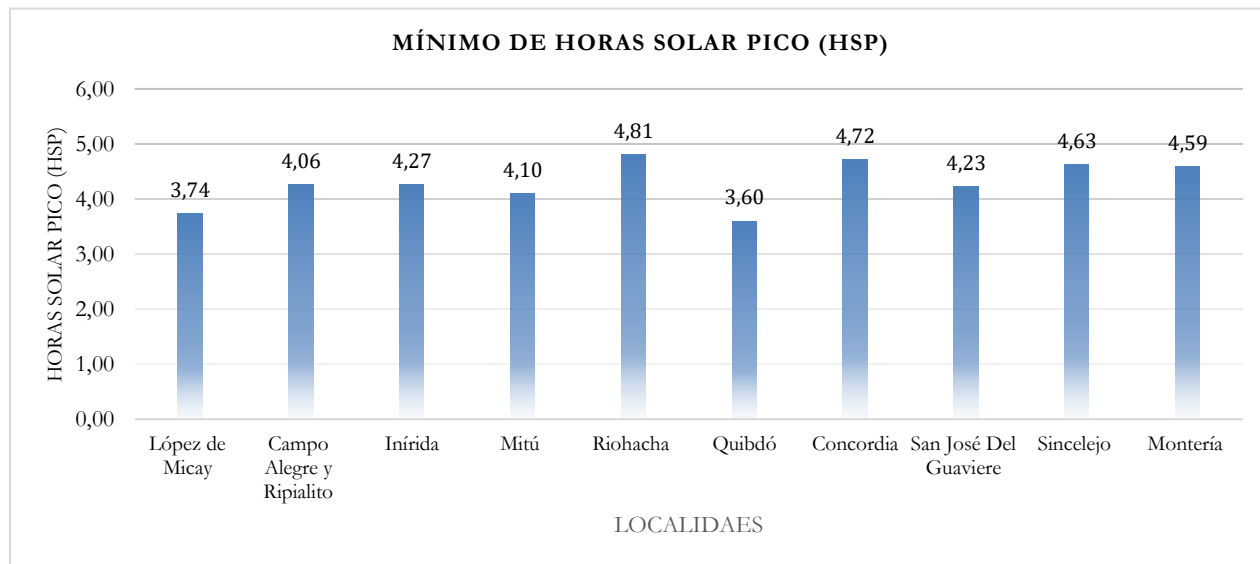
ayudó a identificar comunidades con alto potencial energético y necesidades de desarrollo socioeconómico. Se examinaron 10 ubicaciones en varios departamentos de las ZNI para seleccionar el sitio de estudio más idóneo.

Tabla 2: Matriz de selección.

Matriz de selección							
Departamento	Localidad	IPM (Índice de Pobreza Multidimensional)	% De Hogares sin acceso a servicios de salud	% De Hogares sin acueducto	% De hogares con personas mayores de 15 años y bajo logro educativo	Hogares según acceso a energía eléctrica (Centros poblados y rural disperso)	Mínimo De Horas Solar Pico (HSP)
Cauca	López de Micay	51,6%	11,4%	68,8%	83,5%	308	3,74
Vichada	Campo Alegre y Ripialito	80,6%	17,4%	94,1%	88,9%	2	4,06
Guainía	Inírida	75,9%	4,3%	96,2%	90,1%	3	4,00
Vaupés	Mitú	75,2%	4,9%	92,9%	89,2%	7	4,10
La Guajira	Riohacha	84,6%	27,4%	95,7%	87,0%	33	4,81
Chocó	Quibdó	65,9%	16,5%	89,2%	79,6%	63	3,60
Magdalena	Concordia	67,6%	16,9%	91,1%	85,0%	107	4,72
Guaviare	San José Del Guaviare	53,9%	8,7%	95,6%	89,4%	9	4,23
Sucre	Sincelejo	59,6%	11,4%	55,4%	84,4%	102	4,63
Córdoba	Montería	58,3%	10,2%	68,4%	80,7%	267	4,59

(Elaboración propia)

Gráfico 1: Mínimo De Horas Solar Pico



(Elaboración propia)

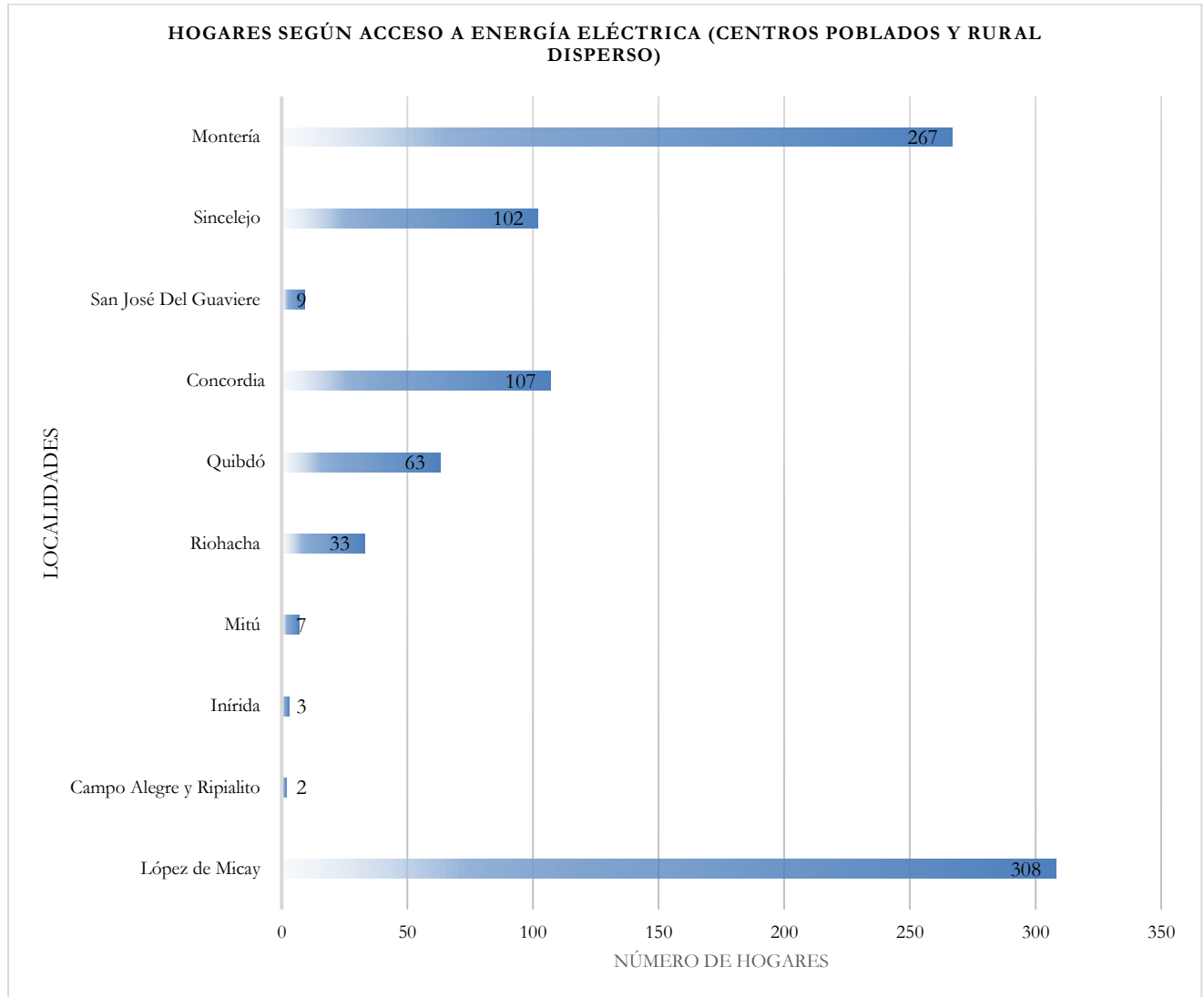
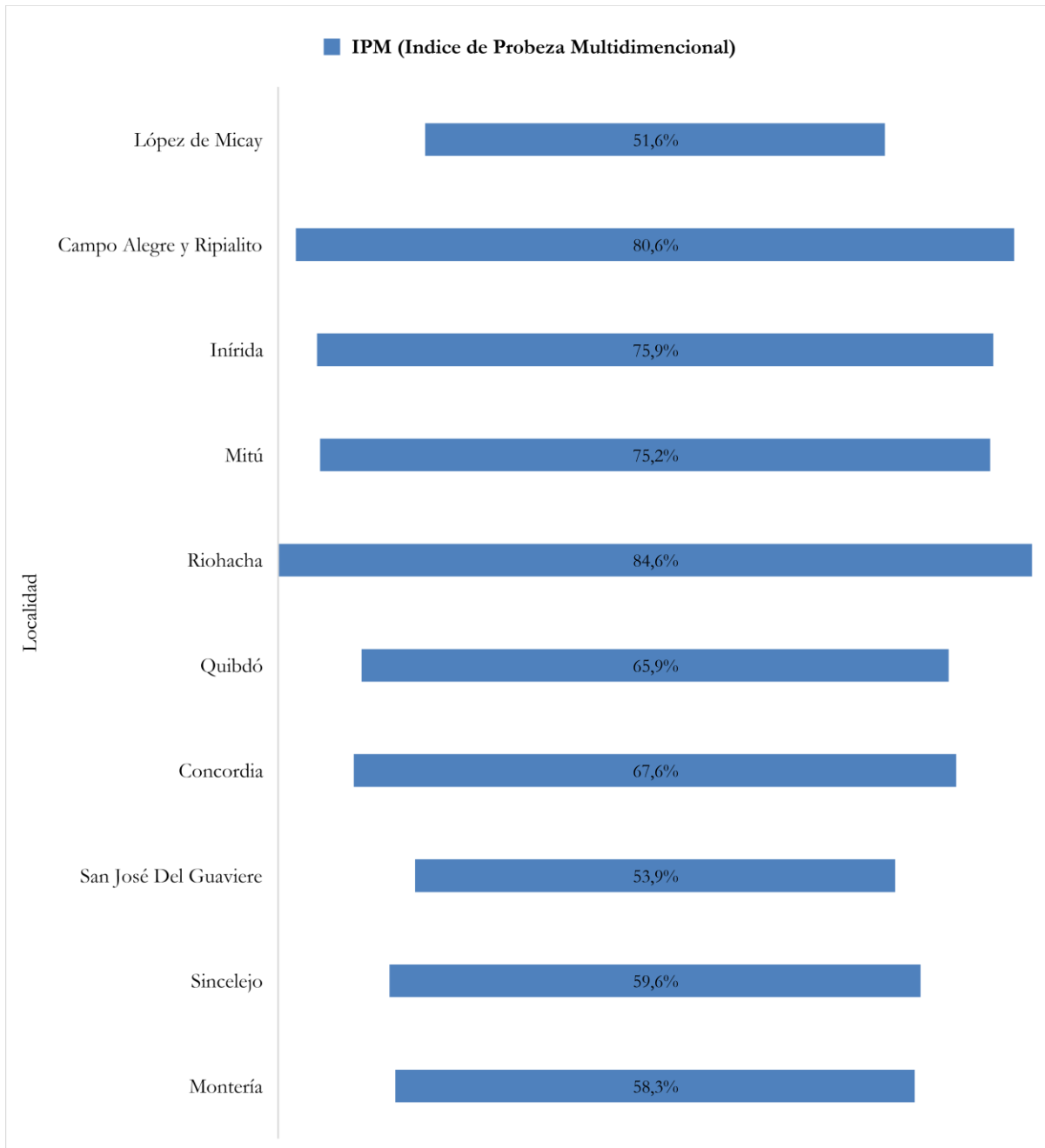
Gráfico 2: Hogares según acceso a energía eléctrica*(Elaboración propia)*

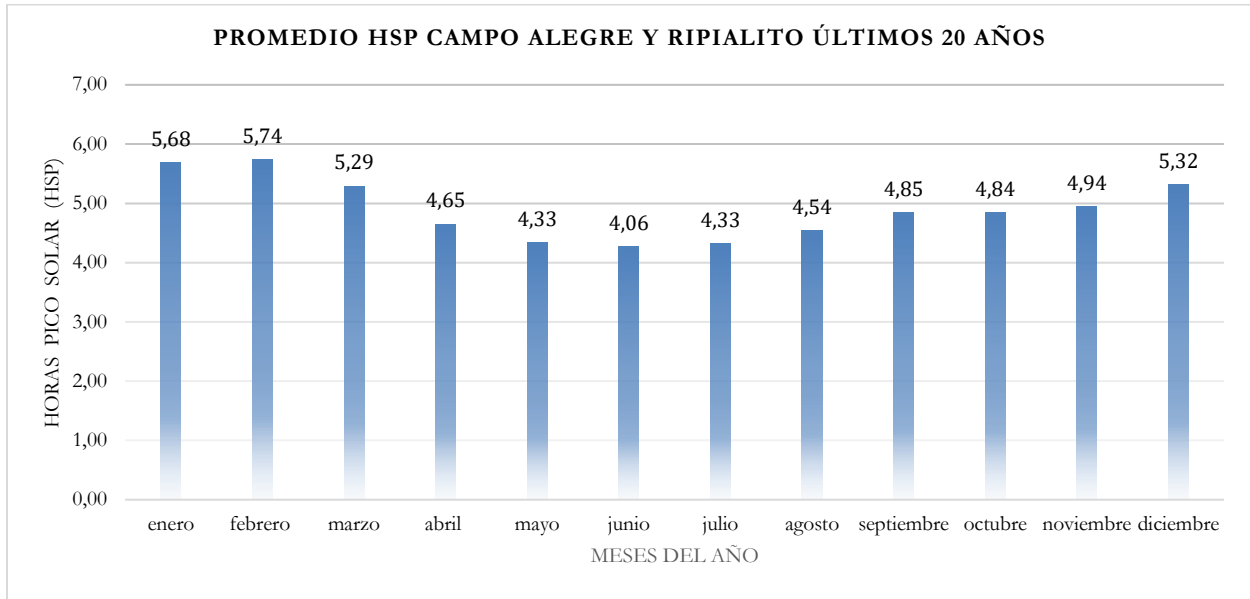
Gráfico 3: Índice de Pobreza Multidimensional



(Elaboración propia)

Campo Alegre y Ripialito, un resguardo indígena con acceso eléctrico limitado fue seleccionado para estudiar sistemas de bombeo solar. Con un 88.9% de baja educación y un 80.6% de pobreza, la comunidad requiere soluciones energéticas. Su potencial de 4.06 HSP lo hace ideal para sistemas solares, superando otras ubicaciones en viabilidad técnica y socioeconómica.

Gráfico 4: HSP Campo Alegre y Ripialito últimos 20 años



(Elaboración propia)

3.3 Identificación de la necesidad puntual

La comunidad indígena de Campo Alegre y Ripialito necesita una solución energética sostenible para el bombeo de agua, ya que carece de energía eléctrica. Han usado motobombas de combustibles fósiles, costosos y dañinos para el medio ambiente. Esto ha dificultado el acceso constante y económico al agua para agricultura y uso humano.

3.4 Caracterización de la demanda de H₂O

Se estimó la demanda utilizando los datos técnicos recientes de la motobomba, que incluían rendimiento y consumo de combustible bajo diferentes cargas.

Tabla 4: Ficha técnica de Motobomba

Características del Motor	
Tipo	Gasolina
Potencia	6.5hp
Marca	Hi-Force
Cilindros	1
Velocidad	3.600 RPM
Arranque	Retractivil
Capacidad del tanque	3.6 litros
Consumo combustible	0.6 galón / hora



De acuerdo con lo anterior y conforme a lo expresado por el líder indígena del resguardo, se determinó que el sistema actual está sobredimensionado y no es eficiente. Se realizaron cálculos centrados en el reemplazo de la motobomba, manteniendo la infraestructura de tuberías actual sin modificaciones. Estos cálculos se llevaron a cabo utilizando la curva de rendimiento de la motobomba a gasolina existente.

3.4.1 Diseño de tanque de almacenamiento H₂O

Seleccionado conforme a los cálculos del suministro diario requerido de 20,890 litros por día, considerando tanto la demanda actual y futura.

Figura 1: Dimensiones del tanque

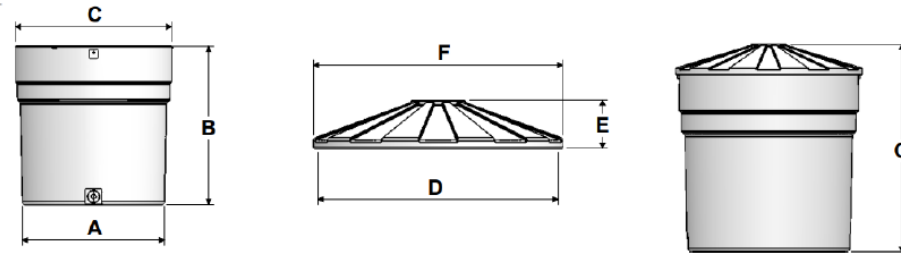


Tabla 5: Dimensionamiento del tanque de almacenamiento

Dimensionamiento del tanque de almacenamiento							
Dimensiones en centímetros							
Producto	A	B	C	D	E	F	G
21000	444 +-1	492+-1	494+-1	494+-1	84+-1	510+-1	550+-1

Este tanque, fabricado por COLEMPAQUES, asegura un suministro constante, esencial para el mantenimiento eficiente de actividades agrícolas.

3.4.2 Cálculo de potencia hidráulica

Se hizo la conversión de GPM a m³/s, resultando en $Q = 46 \text{ gpm}$ equivalen a:

$$Q = 0,002902 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Potencia hidráulica para el sistema:

$$P_h = \left(\frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9,82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \left(0,002902 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) (18\text{m} + 2,36\text{m}) = 580,21 \text{ watts} \approx 0,778074 \text{ HP}$$

Debido al alto costo del combustible, la comunidad usa la motobomba una hora al día, lo que genera 11 m³/día, insuficiente para cubrir sus necesidades. Se planea aumentar el bombeo a 20.89 m³/día.

El tiempo de operación de la bomba eléctrica se determinará en función del volumen de agua requerido y del caudal actual del sistema:

$$\text{Volumen } H_2O = 20,89 \frac{m^3}{s}$$

$$\text{Tiempo de operación} = \frac{20,89 m^3}{0,002902 \frac{m^3}{s}} = \frac{7198,48 s}{3600} = 1,99h \approx 2 \text{ horas}$$

Tiempo de motobomba encendida	2 horas
Altura máxima de bombeo $H_{m\acute{a}x}$	50 metros columna de agua
Caudal máximo de bombeo $Q_{m\acute{a}x}$	42 galones por minuto (GPM)
Potencia (P)	6,5 caballos de fuerza (HP)
Velocidad (V)	3600 revoluciones por minuto (RPM)
Capacidad de tanque C_{tanque}	3,6 litros
Consumo combustible Combustible	0,6 galones por hora (gal/h)
Volumen agua bombeada V_h	20,89 metros cúbicos por día ($m^3/\text{día}$)

Tabla 6: Ficha técnica de bomba a gasolina

3.4.3 Selección de tipo bomba

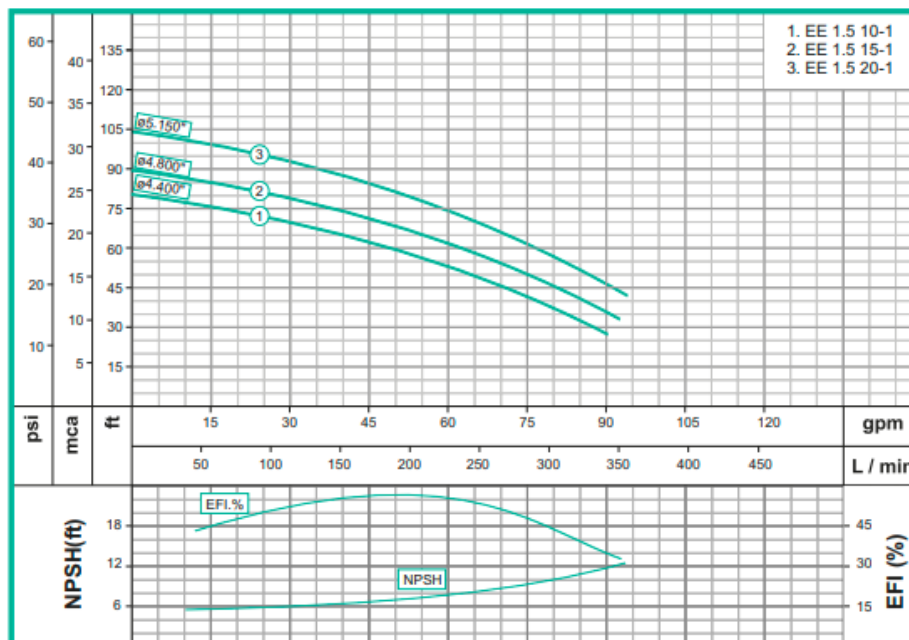
Se seleccionó motobomba de 1,5 HP referencia Barnes EE 1.5 15-1, acorde a ficha técnica.

Tabla 7: Selección de bomba

Demanda de agua diaria	20,89 m^3
Altura de tanque	2,19 metros
Capacidad de almacenamiento del tanque	21 m^3
Altura total de succión	20,36 metros
Caudal	46 GPM

(Elaboración propia)

Imagen 1: Curva de bomba eléctrica referencia Barnes EE 1.5 15-1 (1.5 hp)



3.4.4 Cálculo de la potencia de bomba eléctrica

$$1,5 \text{ HP} \approx 1,11 \text{ kW}$$

$$P_e = 1,11 \text{ kW}$$

3.4.5 Definir el voltaje del sistema

Se Determinó 24V para maximizar la eficiencia y minimizar las pérdidas de energía. (Centeno Alcivar, 2024).

3.5 Selección del inversor.

Se eligió el Inversor Off Grid 1500W 24V PV30-1.5KW LVHM alcanzando una potencia teórica de 1.38 Kw.

Imagen 2: Inversor Off Grid 1500W 24V PV30-1.5KW LVHM



3.6 Cálculo de la energía eléctrica para bombeo solar

Energía eléctrica necesaria (E_e).

$$E_e = \frac{1.11kW * 2h}{0,88} = 2522,72 Wh \approx 2,52 Kwh$$

Potencia requerida por el sistema fotovoltaico, (P_{ph}):

$$P_{ph} = \frac{2,52kWh}{4,06HSP} = 624,43 W$$

3.7 Dimensionamiento Solar fotovoltaico

Se seleccionaron módulos monocristalinos de 400W por lo que el número de unidades necesarias es:

$$N_{total} = \frac{(2,52 kWh * 1,2)}{(4,06 HSP * 400W * 0,8)} = 2,33 \rightarrow 3 \text{ módulos}$$

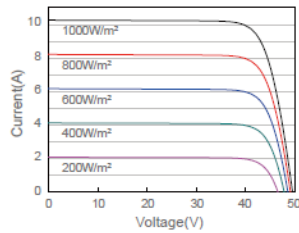
Imagen 3: Características técnicas modulo solar JAM72S10 390-410/PR

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC					
TYPE	JAM72S10 -390/PR	JAM72S10 -395/PR	JAM72S10 -400/PR	JAM72S10 -405/PR	JAM72S10 -410/PR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	390	395	400	405	410
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	48.91	49.21	49.50	49.81	50.12
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	40.55	40.85	41.17	41.46	41.76
Short Circuit Current(Isc) [A]	10.16	10.21	10.26	10.32	10.37
Maximum Power Current(Imp) [A]	9.62	9.67	9.72	9.77	9.82
Module Efficiency [%]	19.4	19.7	19.9	20.2	20.4
Power Tolerance	0~+5W				
Temperature Coefficient of Isc(α_{Isc})	+0.051%/°C				
Temperature Coefficient of Voc(β_{Voc})	-0.289%/°C				
Temperature Coefficient of Pmax(γ_{Pmp})	-0.350%/°C				
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G				

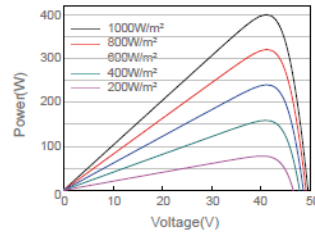
Imagen 4: Características técnicas modulo solar JAM72S10 390-410/

CHARACTERISTICS

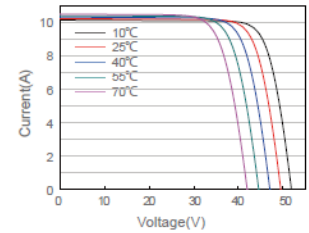
Current-Voltage Curve JAM72S10-400/PR



Power-Voltage Curve JAM72S10-400/PR



Current-Voltage Curve JAM72S10-400/PR



3.7.1 Arreglo fotovoltaico de los módulos

El arreglo fotovoltaico, compuesto por tres módulos solares en serie, optimiza el rendimiento. Cada módulo de 400W contribuye a una potencia total de 1200 watts, cubriendo la demanda energética del sistema de bombeo.

3.7.2 Selección del banco de baterías

Se calculó la capacidad de baterías basándose en el tiempo de uso actual de 2 horas y un 30% de uso de la batería.

$$CapBat = \frac{(2520wh)}{(0,7 * 24v)} = 150 Ah$$

Imagen 5: Características eléctricas de la batería.

► Electrical Characteristics

Model	LFP3.84KW-125.6V-P65L2RP40
Battery Type	LiFePO4
Nominal Voltage (V)	25.6
Nominal Capacity (AH)	150
Energy (WH)	3840
Pack Mode	8S1P
Continuous Discharge Current (A)	120
Charge Cut-off Voltage (V)	28.8
Discharge Cut-off Voltage (V)	20.8
Max.Charge Current (A)	100@30min
Max.Discharge Current (A)	150@30min
Peak Discharge Current (A)	180A@10S
Recommend Discharge Current (A)	80
Recommend Discharge Depth (%)	80
Cycle Life	≥4000 cycles (25°C, 0.5C) 80% DOD
Communication	—
Charge&Discharge Temperature (°C)	Charge: 0°C~+55°C / Discharge: -20°C~+60°C
Optimal Storage Temperature (°C)	5°C ~ +35°C
Recommend Storage Humidity	20%~80%
Terminal	M8
Dimensions (L*W*H) (mm)	525*269*218
Weight (Kg)	35±0.5
Transportation	UN38.3, MSDS
IP Class	IP65

3.8 Simulación del sistema de suministro energético

Con el fin de simular un sistema de bombeo solar para Campo Alegre y Ripialito, se empleó PVsyst versión 7.4.7. Este

sistema integró tres módulos solares monocristalinos de 400 Wp cada uno referencia JAM72S10 400-420/MR, conectados en serie, con Inversor Off Grid 1500W 24V PV30-1.5KW LVHM, tensión de 120 Vac.

Imagen 6: Características Modulo solar

PV module		Pump	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	JAM72-S10-400-PR	Model	4GS05
(Original PVsyst database)		Pump Technology	Centrifugal Multistage
Unit Nom. Power	400 Wp	Deep well pump	
Number of PV modules	3 units	Motor	Async. AC motor, monophased
Nominal (STC)	1200 Wp	Associated or Integrated converter	
Modules	1 strings x 3 In series	Type	MPPT
At operating cond. (50°C)		Voltage range	100 - 600 V
Pmpp	1095 Wp	Operating conditions	
U mpp	112 V		
I mpp	9.8 A		
Total PV power			
Nominal (STC)	1.20 kWp		
Total	3 modules		

	Head min.	Head Nom	Head max.	
Corresp. Flowrate	16.0	33.0	42.0	m
Req. power	5.40	3.60	1.80	m ³ /h
	589	540	434	W

Control device	
Model	Generic device (optimised for the system)
System Configuration	MPPT-AC inverter

Tomado de PVsyst

La eficiencia del sistema en la transformación de energía solar a energía de bombeo fue del 57.1%, con un gasto energético de 893 Kwh.

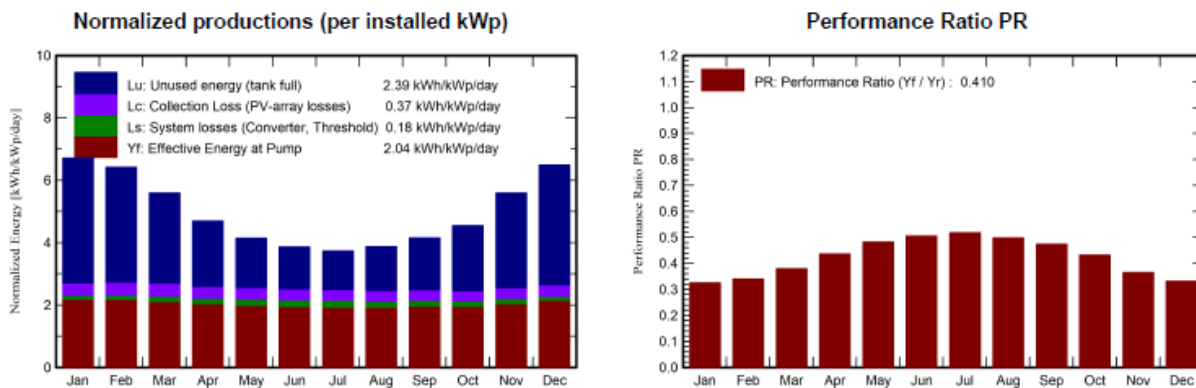
Imagen 7: Características de bomba solar

Results summary			
Water		Energy	
Water Pumped	7584 m ³	Energy At Pump	894 kWh
Specific	2740 m ³ /kWp/bar	Specific	0.12 kWh/m ³
Water needs	7625 m ³	Unused (tank full)	
Missing Water	0.5 %	Unused PV energy	842 kWh
		Unused Fraction	45.4 %
		Efficiencies	
		System efficiency	48.2 %
		Pump efficiency	57.1 %

Tomado de PVsyst

Las pérdidas calculadas se dividen en un 0.5% asociado directamente a los módulos solares y un 1.5% adicional atribuido a otros factores, incluyendo la eficiencia del sistema de bombeo.

Imagen 8: Producción mensual de energía



Tomado de PVsyst

El gráfico detalló el consumo energético durante el funcionamiento de la bomba.

3.9 Beneficio Ambiental y económico

La motobomba produce cerca de 6.639 toneladas de CO_{2e} al año, evidenciando un fuerte impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero. La adopción de tecnología solar ayuda a preservar el medio ambiente y lucha contra el cambio climático (Catalán, 2020).

Tabla 10: Emisiones totales de GEI en CO_{2e}

Parámetro	Valor
Consumo diario de gasolina	2 galones
Conversión a litros	7.57082 litros
Emisiones diarias de CO ₂	17.4726 kg CO ₂
Emisiones anuales de CO ₂	6377.5 kg CO ₂
Emisiones anuales de CO ₂	6.3775 toneladas CO ₂
Factor de emisión de CH ₄	0.024 g CH ₄ /MJ
Poder calorífico por litro	33.3 MJ/litro
Emisiones diarias de CH ₄	6.0545 g CH ₄
Emisiones anuales de CH ₄	2219.9 g CH ₄
Emisiones anuales de CH ₄	0.00222 toneladas CH ₄
Emisiones anuales de CH ₄ en CO _{2e}	55.5 kg CO _{2e}
Emisiones anuales de CH ₄ en CO _{2e}	0.0555 toneladas CO _{2e}
Factor de emisión de N ₂ O	0.0075 g N ₂ O/MJ
Emisiones diarias de N ₂ O	1.8934 g N ₂ O
Emisiones anuales de N ₂ O	691.1 g N ₂ O
Emisiones anuales de N ₂ O	0.6911 kg N ₂ O
Emisiones anuales de N ₂ O	0.0006911 toneladas N ₂ O
Emisiones anuales de N ₂ O en CO _{2e}	205.9758 kg CO _{2e}
Emisiones anuales de N ₂ O en CO _{2e}	0.206 toneladas CO _{2e}
Emisiones totales de GEI en CO _{2e}	6638.9758 kg CO _{2e}
Emisiones totales de GEI en CO_{2e}	6.639 toneladas CO_{2e}

(Elaboración propia)

Tabla 11: Desglose de Costos para el Sistema de Bombeo Solar

Categoría	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Gastos Iniciales				
Módulos solares	JAM72S10 400-420/MR	3	\$ 550.000,00	\$ 1.650.000,00
Inversores	Inversor Híbrido Off Grid 24V 1.500W	1	\$ 2.800.000	\$ 2.800.000,00
Baterías (si aplica)	Batería De Litio 150Ah 24V Epever	1	\$ 4.250.000,00	\$ 4.250.000,00
Bomba de agua solar	Bomba Centrifuga Barnes 1.5 HP 110/220V-1F 1A0084	1	\$ 1.434.000,00	\$ 1.434.000,00
Estructuras de montaje	Estructura suelo 15°-30° 4 módulos	1	\$ 950.000,00	\$ 950.000,00
Cables, conectores y Protección eléctrica	Dispositivos contra sobrecargas y cortocircuitos	1	\$ 1.500.000,00	\$ 1.500.000,00
Mano de Obra				\$ -
Instalación de módulos solares	Mano de obra para la instalación física	1	\$ 15.000.000,00	\$ 15.000.000,00
Diseño y planificación	Servicios profesionales para el diseño del sistema	1	\$ 7.000.000,00	\$ 7.000.000,00
Seguro	Protección contra daños o robos	1	\$ 500.000,00	\$ 500.000,00
Otros Gastos				
Tanque de almacenamiento de agua	Tanque de 20,000 litros para almacenamiento de agua	1	\$ 23.910.900	\$ 23.910.900,00
Transporte y viáticos	Gastos de transporte, viáticos, almuerzo y hospedaje del personal	1	\$ 16.500.000,00	\$ 16.500.000,00
TOTAL				\$ 75.494.900,00

(Elaboración propia)

Tabla 12: Análisis Económico del Sistema

Año	Inversiones		Mantenimiento	Gastos	Total inversiones y gastos	Inversiones y gastos en valor presente	Retornos	Flujo de caja	Flujo de caja valor actual	Valor presente neto (VPN)	Inversiones en valor presente	Retorno de la inversión
	Valor actual	Valor futuro										
1	\$ 75.494.900	\$ 75.494.900		\$ 75.494.900	\$ 75.494.900	\$ 75.494.900	\$ 20.440.000	-\$ 55.054.900	-\$ 55.054.900	\$ 247.895.003	\$ 96.384.114	-\$ 55.054.900
2				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 21.666.400	\$ 21.666.400	\$ 20.061.481	Relación beneficio costo 2,6		-\$ 34.993.419
3				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 22.966.384	\$ 22.966.384	\$ 19.689.973			-\$ 15.303.446
4				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 24.344.367	\$ 24.344.367	\$ 19.325.343	TIR 43%		
5			\$ 8.943.890	\$ 8.943.890	\$ 8.943.890	\$ 6.574.026	\$ 25.805.029	\$ 16.861.140	\$ 12.393.441			
6				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 27.353.331	\$ 27.353.331	\$ 18.616.217			
7				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 28.994.531	\$ 28.994.531	\$ 18.271.473			
8				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 30.734.202	\$ 30.734.202	\$ 17.933.112			
9				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 32.578.255	\$ 32.578.255	\$ 17.601.017			
10			\$ 11.145.714	\$ 11.145.714	\$ 11.145.714	\$ 5.575.632	\$ 34.532.950	\$ 23.387.236	\$ 11.699.441			
11				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 36.604.927	\$ 36.604.927	\$ 16.955.164			
12				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 38.801.223	\$ 38.801.223	\$ 16.641.179			
13				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 41.129.296	\$ 41.129.296	\$ 16.333.009			
14				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 43.597.054	\$ 43.597.054	\$ 16.030.546			
15			\$ 13.889.587	\$ 13.889.587	\$ 13.889.587	\$ 4.728.863	\$ 46.212.877	\$ 32.323.290	\$ 11.004.821			
16				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 48.985.649	\$ 48.985.649	\$ 15.442.320			
17				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 51.924.788	\$ 51.924.788	\$ 15.156.351			
18				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 55.040.276	\$ 55.040.276	\$ 14.875.678			
19				\$ -	\$ -	\$ -	\$ 58.342.692	\$ 58.342.692	\$ 14.600.202			
20			\$ 17.308.952	\$ 17.308.952	\$ 17.308.952	\$ 4.010.693	\$ 61.843.254	\$ 44.534.301	\$ 10.319.135			

(Elaboración propia)

El estudio financiero evidenció su factibilidad económica. Iniciándose con una inversión de \$75.494.900,00, el VAN calculado fue de \$247.895.003. La TIR se calculó en 43%, superando la tasa de descuento, lo que subraya la rentabilidad del proyecto.

4. CONCLUSIONES

El diseño y la simulación del sistema de bombeo solar para el resguardo indígena de Campo Alegre en el municipio de La Primavera, Vichada, demuestran la viabilidad y la importancia de implementar soluciones tecnológicas sostenibles en comunidades aisladas.

La interacción con Jaideir Camacho, líder de Campo Alegre y Ripialito, resaltó la crítica falta de electricidad en la comunidad, dependiendo actualmente de motobombas de gasolina. Esto subraya la imperiosa necesidad de energías más eficientes y sostenibles para mejorar la vida local.

Se reveló la necesidad de reconsiderar el uso de estas tecnologías en regiones aisladas. Aunque los grupos electrógenos han sido una solución tradicional, su eficiencia limitada y el impacto ambiental asociado subrayan la urgencia de explorar alternativas sostenibles y eficientes.

Estos hallazgos respaldan la importancia del Plan Nacional de Desarrollo de Colombia en la promoción de energías renovables y el apoyo a comunidades rurales.

5. REFERENCIAS

- Adrian Gil Hueso, G. (n.d.). *ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR DE BOMBEO DE AGUA PARA ZONAS RURALES DE LA GUAJIRA COLOMBIANA*. Retrieved June 21, 2024, from <https://hdl.handle.net/1992/73379>
- Avila, F., Vera, L. H., Mina, M. J., & Sánchez, R. R. (2015). Sistema móvil de bombeo y desalinización de agua. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 2. <https://doi.org/10.30972/eitt.202837>
- Cabrales, S., & Delgado, M. E. (2019). *Transición energética en Colombia: Política, costos de la carbono-neutralidad acelerada y papel del gas natural*. Director. https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/4318/Repor_Agosto_2022_Benavides_Cabrales_y_Delgado.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Camacho, A. J., Pino, F. J., & Sevilla, L. (2021). *Estudio del empleo de paneles fotovoltaicos bifaciales mediante simulaciones basadas en PV Syst*. <https://idus.us.es/handle/11441/126640>
- Camilo Fuentes Amín, O., & Esteban Romero Torres, M. (2020). *Procedimiento para el dimensionamiento de sistemas autónomos de generación de energía solar fotovoltaica Procedure for Sizing of Offgrid Photovoltaic Energy Systems*.
- Catalán, H. (2020). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. *Problemas Del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 52(204). <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.204.69611>
- Centeno Alcivar, J. R. (2024). Metodología para el cálculo de una instalación fotovoltaica off-grid. *Reincisol*, 3(5). [https://doi.org/10.59282/reincisol.v3\(5\)192-209](https://doi.org/10.59282/reincisol.v3(5)192-209)
- Colmenares-Quintero, R. F., Latorre-Noguera, L. F., Rojas, N., Kolmsee, K., Stansfield, K. E., & Colmenares-Quintero, J. C. (2021). Computational framework for the selection of energy solutions in indigenous communities in Colombia: Kanalitojo case study. *Cogent Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1926406>
- Congreso de la República de Colombia. (1890). *Ley 89 de 1890*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=4920>
- DANE. (2019). *Censo nacional de población y vivienda 2018*. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-presentacion-3ra-entrega.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2018). *Evaluación de la política de servicios públicos domiciliarios en temas de energía eléctrica en el país*. <https://anda.dnp.gov.co/index.php/catalog/99/overview>
- El Congreso de Colombia. (2023). *Ley 2294 de 2023*. Art. 235, núm. 25. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=209510
- Fernández Barón, A. J. (2019). *Evaluation of economic and social impact of electrification in non-interconnected zones (NIZ) of rural areas in Colombia*.
- Galindo, A., Pérez, J., & Rojano, R. (2017). Una Comunidad Indígena Del Norte De Colombia Measures of Adaptation To Climate Change in an. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(1).
- Gerardo, L., Cornejo, V., Querevalú, A., Presidente, M., Mendoza, L. L., Henry, H., & Chapoñan, S. (2024). *Diseño de un sistema de bombeo solar para almacenamiento de agua usada en sistemas de riego en zonas agrícolas aisladas*. <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/7238>
- Gina Rodríguez - Borges, C., & Sarmiento - Sera, A. (2011). Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural. *Ingeniería Mecánica*, 14(1), 13–21.
- Hernán Flórez Acosta, J., Tobón Orozco, Da., & Adolfo Castillo Quintero, Gustavo. (2009). *¿Ha sido efectiva la promoción de*

*soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia?: un análisis de la estructura institucional** (Vol. 22, Issue 38).

- Hernández, G. (2021). Emissions of greenhouse gases and key sectors in Colombia. *Trimestre Económico*, 88(350), 523–550. <https://doi.org/10.20430/ETE.V88I350.857>
- Hernández, M. F., Aguado, L., & Duque, H. (2018). Índice de pobreza energética multidimensional por regiones para Colombia, IPEM_RC 2013. *Economía Coyuntural*.
- Hoyos, F., Correa, J., Becerra, J., & Jimenez, D. (2019). MODELO APLICADO EN POBLACIONES DE ZNI DE COLOMBIA PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- IDEAM. (2022). Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM. In *Datos abiertos* (pp. 1–1). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu>
- IPSE. (2024). *INFORME MENSUAL DE LOCALIDADES SIN TELEMETRÍA DE LAS ZNI*. https://ipse.gov.co/documentos_cmn/documentos/informe_mensual_localidades_sin_telemetria/2023/03-INFORME_LOCALIDADES_SIN_TELEMETRÍA_ZNI_MARZO-2023.pdf
- Juan Daniel Rivas Casarrubia. (2020). Implementación de un Sistema de Bombeo de Agua, Alimentado con Energía Solar en la Universidad de Córdoba - Colombia. *Vestigium Ire.*, 15–1.
- Melo Vega, A., Silva Daza, J. D., & Olaya Barragán, N. S. (2022). *Diseño de un sistema de riego con bombeo solar fotovoltaico para un cultivo de palma de aceite en el municipio de San Carlos de Guaroa (Meta)*. <https://doi.org/10.26507/paper.2421>
- Muñoz-Arias, C., Villamil-Villar, B., Restrepo-Álvarez, A., & Bolívar-Chaves, O. (2021). Estudio socio-técnico del uso de energías renovables como alternativa de iluminación en las comunidades de las zonas no interconectadas. *Revista UIS Ingenierías*, 21(1). <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022002>
- Naciones Unidas. (n.d.). *Energía - Desarrollo Sostenible*. Retrieved June 23, 2024, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- NASA POWER. (2024, June 15). *NASA POWER Data Access Viewer*. NASA Langley Research Center. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Raúl, J., & Revelo, L. (2018). *Análisis de la Interconexión al SIN y GD para los municipios pertenecientes a la ZNI de los departamentos del Cauca y Nariño*.
- Toro, A., Gomera, A., Aguilar, J., Guijarro, C., Antúnez, M., & Vaquero, M. (2014). *Calculo de la Huella de Carbono. Servicio de Protección Ambiental*.
- Trujillo, L., Subdirector, O., Patricia, Á., Landaeta, V., Enrique, Á., Soto, D., Liliana, S., Mayorga, M., Pisco, A. R., Alejandra, J., Villa, S., Pablo, J., Torres, C., Felipe, A., Rico, O., María, A., Hernández, Z., Jhonnathan, R., Lizarazo, C., ... Vargas, R. (2023). *Información sociodemográfica del pueblo Sikuani*. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/informes-estadisticas-sociodemograficas/2023-02-15-informacionsocion-pueblo-sikuani.pdf>