

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



**ANÁLISIS PARA LA INSTALACIÓN DE SISTEMAS SOLARES
FOTOVOLTAICOS PARA BOMBEO DE AGUA EN ZONAS RURALES
DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

GREGORIO SIGFREDO MANCÍA ROQUE

RICARDO JOSÉ NAVARRETE NAVARRO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LCDO. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

M.Sc. ELMER ARTURO CARBALLO RUÍZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

Título:

**ANÁLISIS PARA LA INSTALACIÓN DE SISTEMAS SOLARES
FOTOVOLTAICOS PARA BOMBEO DE AGUA EN ZONAS RURALES
DE EL SALVADOR**

Presentado por:

GREGORIO SIGFREDO MANCÍA ROQUE

RICARDO JOSÉ NAVARRETE NAVARRO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

M.Sc. ÁLVARO RENÉ FLAMENCO RAMOS

SAN SALVADOR, JUNIO 2025

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

M.Sc. ÁLVARO RENÉ FLAMENCO RAMOS

AGRADECIMIENTO 1

Expreso mi más profundo agradecimiento a todas las personas que fueron compañeros de camino a lo largo de este proceso.

Agradecimiento especial a nuestro asesor de tesis que, a pesar de los altos y bajos, estuvo presente y dispuesto a darnos su conocimiento y apoyo hasta la culminación del presente trabajo.

Agradezco a la Autoridad Salvadoreña del Agua por su aporte importante en el establecimiento de contactos de Sistemas de Agua Rurales para poder ser parte de este trabajo.

A mi compañero de tesis y de camino durante todo el proceso de Máster con quien hemos superado retos desde el primer día de esta travesía. Sin duda fue un placer compartir conocimientos codo a codo.

A mi compañera de camino y de vida, por toda su motivación en esta recta final. Por tu comprensión, impulso, consejo, paciencia y motivación que me has dado en este proceso, gracias de todo corazón.

A mis amigos, familia y demás personas que han tenido una palabra de aliento y motivación en los días que se veía lejano el momento de culminar este camino, les agradezco inmensurablemente.

A Dios, por darme la sabiduría y capacidades para poder abstraer el mundo que nos puso al frente y darme esas ganas de protegerlo y hacerlo sostenible.

Ricardo Navarrete

AGRADECIMIENTO 2

Quiero agradecer principalmente a mis padres Dora Isabel Roque de Mancía y Elí Sigfredo Mancía por el apoyo y motivación de inicio a fin desde que inicie este bonito camino de la maestría, a mi hermana Nathalie Margarita Mancía Roque quien me apoyo durante muchas de las etapas de la maestría. Agradecer a Dios por darme salud y permitirme completar este camino que no ha sido fácil.

También mis compañeros con quienes logramos cada paso desde la primera materia hasta la última, a nuestro asesor el Ingeniero Álvaro Flamenco, quien nos guió con sus aportes y su conocimiento sobre la materia a lo largo no solamente del desarrollo de la tesis, sino también como docente en algunas materias dentro del programa. A mí compañero Ricardo Navarrete con quien trabajamos para que este proyecto finalizara y con quien compartimos de inicio a fin en este trabajo y maestría.

Igualmente, a todos aquellos amigos, amigas y seres queridos que formaron parte y de una u otra forma de este logro y quienes de alguna manera me apoyaron y me motivaron a completar este reto.

Finalmente, agradecer a todos aquellos docentes que aportaron su parte y su conocimiento, que dedicaron horas de su tiempo para orientarnos y guiarnos durante el gran proceso que ha sido esta maestría. Orgullosamente completamos este aporte a la Universidad de El Salvador, que espero sea de utilidad para futuros estudiantes, investigadores o empresas y que contribuya al desarrollo de futuras generaciones. Hacia la libertad por la cultura.

Sigfredo Roque

INDICE

INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE TABLAS	xiii
DEFINICIONES	xvi
ABREVIACIONES.....	xix
RESUMEN.....	xxi
INTRODUCCIÓN	xxiii
1. Generalidades.....	25
1.1. Antecedentes y justificación	25
1.2. Planteamiento del problema.....	26
1.3. Objetivos	28
1.3.1. Objetivo general.....	28
1.3.2. Objetivo específico	28
2. Marco referencial	29
2.1. Sistemas de bombeo a base de energía solar fotovoltaica en áreas rurales alrededor del mundo.	29
2.2. Sistemas de Agua Potable no administrados por ANDA en El Salvador 32	
2.2.1. Juntas de Agua en El Salvador	34
2.3. Recurso solar en El Salvador	35
3. Descripción de los sitios	37

3.1.	Sitio 1: Caserío San Antonio La Labor	38
3.1.1.	Características de la población.....	38
3.1.2.	Situación actual de la distribución de agua potable	40
3.2.	Sitio 2: Caserío Casa Blanca.....	44
3.2.1.	Características de la población.....	44
3.2.2.	Situación actual de la distribución de agua potable	45
3.3.	Sitio 3: Caserío Aguacayo y Montañita	49
3.3.1.	Características de la población.....	49
3.3.2.	Situación actual de la distribución de agua potable	51
3.4.	Sitio 4: Distrito El Sauce	53
3.4.1.	Características de la población.....	53
3.4.2.	Situación actual de la distribución de agua potable	55
4.	Estudio de recurso solar	58
4.1.	Disponibilidad de recurso solar	58
4.2.	Datos meteorológicos.....	59
4.3.	Metodología propuesta para estudio de localización de paneles solares	
	61	
4.3.1.	Caso de estudio: Distrito El Sauce	64
5.	Planteamiento de solución por sitio	68
5.1.	Sitio 1: Caserío San Antonio La Labor	68
5.1.1.	Diseño de sistema fotovoltaico conectado a red	69

5.1.2. Diseño sistema de bombeo nuevo alimentado con energía solar fotovoltaica.....	71
5.1.3. Diagrama unifilar.....	77
5.2. Sitio 2: Caserío Casa Blanca.....	78
5.2.1. Dimensionamiento sistema solar fotovoltaico.....	79
5.2.2. Diagrama unifilar.....	85
5.3. Sitio 3: Caserío Aguacayo y Montañita	86
5.3.1. Diseño del sistema fotovoltaico conectado a red.....	86
5.3.2. Diagrama unifilar.....	88
5.4. Sitio 4: Distrito El Sauce	89
5.4.1. Diseño del sistema fotovoltaico conectado a red.....	89
5.4.1. Diagrama unifilar.....	91
6. Estudio económico.....	93
6.1. Sitio 1: Caserío San Antonio La Labor	93
6.1.1. Análisis económico para sistema conectado a red	93
6.1.2. Análisis económico para sistema independiente	96
6.2. Sitio 2: Caserío Casa Blanca.....	97
6.3. Sitio 3: Caserío Aguacayo y Montañita	99
6.4. Sitio 4: Distrito El Sauce	100
6.5. Análisis de sensibilidad	102
CONCLUSIONES	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

ANEXOS	111
ANEXO A. Resultado de simulación en PVSyst para propuesta de diseño solar fotovoltaico conectado a red de Caserío San Antonio La Labor.	111
ANEXO B. Resultado de simulación en PVSyst para propuesta de diseño solar fotovoltaico conectado a red de Caseríos Aguacayo y Montañita.....	112
ANEXO C. Resultado de simulación en PVSyst para propuesta de diseño solar fotovoltaico conectado a red de Distrito El Sauce.....	113

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de SAP's en El Salvador. (VIELCA, 2015)	32
Figura 2. Mapa de irradiancia de El Salvador. (Solar resource map, 2021)	37
Figura 3. Ubicación de los sitios visitados para el estudio. Elaboración propia.	38
Figura 4. Gráfica del crecimiento poblacional proyectado para el Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.....	40
Figura 5. a) Tubería de hierro galvanizado de 2 pulg. De diámetro. b) Tanque de captación de 8 m ³ . c) Tanque de captación de 15 m ³ para distribución por gravedad. d) Estación de bombeo. Fuente propia.....	42
Figura 6. a) Topografía del terreno próximo a la línea de distribución eléctrica. b) Acometida eléctrica para la estación de bombeo. Fuente propia.	43
Figura 7. Gráfica del crecimiento poblacional proyectado para el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.....	45
Figura 8. Descripción del sistema de bombeo actual en el Caserío Casa Blanca. Fuente: propia.	46
Figura 9. Sistema de filtración White box y purificación por osmosis inversa para la comunidad. Fuente: propia.	48
Figura 10. A) vista frontal del sistema de filtrado de partículas por gravedad; B) interior del sistema de filtrado; C) Tanque de captación de 175 barriles (27 822.7 litros). Fuente: propia.	49
Figura 11. Gráfica del crecimiento poblacional proyectado para el Caserío Aguacayo y Montañita. Elaboración propia.....	50
Figura 12. A) Pozo de extracción de agua. B) Casa de control eléctrico. C) Acometida eléctrica. Elaboración propia.	51
Figura 13. A) Tanque de captación de agua. B) Tubería de acero de 3 pulg de diámetro para el transporte de agua. Elaboración propia.....	52

Figura 14. Crecimiento poblacional en Distrito El Sauce. Elaboración propia.	54
Figura 15. A) Pozo de extracción de agua. B) Casa de control eléctrico. C) Acometida eléctrica de Distrito El Sauce. Elaboración propia.	55
Figura 16. A) Tanque de captación de agua de 111 m ³ B) Tanque de captación de agua de 190 m ³ . C) Tubería de acero de 4 pulg. de diámetro para el transporte de agua de Distrito El Sauce. Elaboración propia.	56
Figura 17. Mapa ubicación de los sitios de análisis en el mapa de distribución de irradiancia de El Salvador. Editado de: Solar resource map, 2021.....	58
Figura 18. Modelo Digital de Elevaciones del área de estudio en Distrito El Sauce. Fuente: NASA-SSE.	64
Figura 19. Mapa de aspecto del Distrito El Sauce. Elaboración propia haciendo uso de QGIS.	65
Figura 20. Mapa de distribución de irradiancia del Distrito El Sauce. Elaboración propia en QGIS y complemento GRASS.....	66
Figura 21. Propuesta de diseño tipo optimizado de sistema de bombeo fotovoltaico para Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.....	69
Figura 22. Propuesta de sistema hidráulico nuevo para Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.....	72
Figura 23. Diámetro óptimo de tubería para sistema solar del Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.....	75
Figura 24. Diagrama unifilar del sistema propuesto para el Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.....	78
Figura 25. Propuesta de sistema hidráulico nuevo para Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.	79
Figura 26. Cálculo del diámetro óptimo para sistema de bombeo en Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.....	83

Figura 27. Curva de operación del Fhoton 3 Solarpak 7.5HP. Fuente: Franklin Electric.	84
Figura 28. Diagrama unifilar del sistema propuesto para cada bomba del Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.....	86
Figura 29. Diagrama unifilar para Caserios Aguacayo y Montañita. Elaboración propia.	89
Figura 30. Diagrama unifilar para Distrito El Sauce. Elaboración propia.	92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estimación de la población en el Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.	40
Tabla 2. Desglose de ingresos y costos del sistema de administración del agua en Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.....	42
Tabla 3. Estimación de la población en el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia...	45
Tabla 4. Desglose de ingresos y costos del sistema de administración del agua en Caserío Casa Blanca. Elaboración propia con base a entrevista realizada.	47
Tabla 5. Estimación de la población en el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia...	50
Tabla 6. Pliego tarifario para el cobro de agua en las comunidades Aguacayo y Montañita. Fuente: elaboración propia con base a entrevista realizada.	52
Tabla 7. Desglose de ingresos y costos del sistema de administración del agua en Caserío Aguacayo y Montañita. Elaboración propia.....	53
Tabla 8. Estimación de la población en el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia...	54
Tabla 9. Pliego tarifario para el cobro de agua en las comunidades Aguacayo y Montañita. Fuente: elaboración propia con base a entrevista realizada.	56
Tabla 10. Desglose de ingresos y costos del sistema de administración del agua en Caserío Aguacayo y Montañita. Elaboración propia.....	57
Tabla 11. Datos meteorológicos del Caserío La Labor. Fuente: Meteorom 8.1 y NASA.	59
Tabla 12. Datos meteorológicos del Caserío Casa Blanca. Fuente: Meteorom y NASA.	60
Tabla 13. Datos meteorológicos de los Caseríos Aguacayo y Montañita. Fuente: Meteorom y NASA.....	60
Tabla 14. Datos meteorológicos de Distrito El Sauce. Fuente: Meteorom y NASA.	61

Tabla 15. Clasificación de direcciones obtenidas en un mapa de aspecto (RoCa SIG, 2021).	63
Tabla 16. Histórico de facturación eléctrica para estación de bombeo Caserío San Antonio La Labor. Fuente: AES	70
Tabla 17. Resumen del sistema solar fotovoltaico conectado a red para Caserío San Antonio la Labor. Elaboración propia a través de PVSyst 7.4.	71
Tabla 18. Resumen de parámetros utilizados para cálculo de altura dinámica de la bomba para el sistema hidráulico propuesto para el Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.	74
Tabla 19. Resumen de parámetros utilizados para cálculo de altura dinámica de la bomba para el sistema hidráulico propuesto para el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.	82
Tabla 20. Histórico de facturación eléctrica para estación de bombeo Caserío Aguacayo y Montañita. Fuente: Directivos de la Junta de Agua del caserío Aguacayo y Montañita.	87
Tabla 21. Resumen del sistema solar fotovoltaico conectado a red para Caserío Aguacayo y Montañita. Elaboración propia a través de PVSyst 7.4.	88
Tabla 22. Histórico de facturación eléctrica para estación de bombeo Distrito El Sauce. Fuente: Directivos de Junta de Agua de El Sauce.	90
Tabla 23. Resumen del sistema solar fotovoltaico conectado a red para Distrito El Sauce. Elaboración propia a través de PVSyst 7.4.	91
Tabla 24. Costos de sistema solar conectado a red Caserío San Antonio La Labor. Fuente: elaboración propia.	93
Tabla 25. Costos de sistema solar independiente de la red Caserío San Antonio La Labor. Fuente: elaboración propia.	96

Tabla 26. Resultado de evaluación económica para sistema independiente de la red Caserío San Antonio La Labor. Fuente: elaboración propia.	97
Tabla 27. Costos de sistema solar independiente de la red Caserío Casa Blanca. Fuente: elaboración propia.	98
Tabla 28. Resultado de evaluación económica para sistema independiente de la red Caserío Casa Blanca. Fuente: elaboración propia.	98
Tabla 29. Costos de sistema solar conectado a red Caserío Aguacayo y Montañita. Fuente: elaboración propia.	99
Tabla 30. Resultado de evaluación económica para sistema independiente de la red Caserío Aguacayo y Montañita. Fuente: elaboración propia.	100
Tabla 31. Costos de sistema solar conectado a red Distrito El Sauce. Fuente: elaboración propia.	101
Tabla 32. Resultado de evaluación económica para sistema independiente de la red Distrito EL Sauce. Fuente: elaboración propia.	101
Tabla 33. Resultados del análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.....	103

DEFINICIONES

Acarreo de Agua: Método tradicional de abastecimiento donde los usuarios transportan agua de fuentes cercanas, generalmente fuera de su hogar.

ANDA: Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados de El Salvador, responsable del suministro de agua potable y alcantarillado.

Asociaciones Comunitarias: Grupos organizados que gestionan servicios comunitarios, como el abastecimiento de agua, en zonas rurales.

Bombeo de Agua: Proceso de mover agua de un lugar a otro, a menudo utilizando bombas para facilitar el transporte.

Calidad del Agua: Conjunto de características físicas, químicas y biológicas que determinan la aptitud del agua para su consumo humano.

Comunidad Rurales: Grupos de personas que viven en áreas rurales y que suelen tener acceso limitado a servicios básicos como agua potable y electricidad.

Conectividad a Red: Capacidad de un sistema fotovoltaico para estar interconectado con la red eléctrica, permitiendo el intercambio de energía.

Costos de Operación: Gastos asociados al funcionamiento de un sistema o servicio, incluyendo mantenimiento y energía.

Costos Iniciales de Instalación: Gastos requeridos para establecer un nuevo sistema fotovoltaico, incluyendo materiales y mano de obra.

Dimensionalización: Proceso de calcular y diseñar los tamaños y capacidades de componentes en un sistema.

Documentación Georreferenciada: Información espacialmente precisa que permite identificar y gestionar recursos, como los sistemas de agua existentes en un área específica.

Energía Renovable: Energía obtenida de fuentes que se regeneran de forma natural, como la solar, eólica o hidráulica.

Energía Solar: Energía que se obtiene directamente del sol, utilizada para diferentes aplicaciones, incluyendo la generación de electricidad.

Estrategia de Mejora: Plan o método propuesto para optimizar un sistema o proceso existente.

Estudios Meteorológicos: Análisis de las condiciones atmosféricas en una región, esenciales para determinar la viabilidad de sistemas de energía solar.

Evaluación de Factibilidad: Análisis que determina si un proyecto es viable desde el punto de vista técnico, financiero y operativo.

Fondo de Mantenimiento: Recursos financieros destinados a asegurar la operación y el mantenimiento continuado de un sistema de abastecimiento de agua.

Fotovoltaico Off-Grid: Sistemas solares que funcionan de forma independiente de la red eléctrica, utilizados en áreas no conectadas a la misma.

Impacto Ambiental: Efectos que un proyecto o actividad puede tener sobre el medio ambiente, evaluados para garantizar la sostenibilidad.

Irradiancia Solar: Cantidad de energía solar recibida por unidad de área en un período de tiempo determinado.

Mantenimiento Preventivo: Acciones tomadas para prevenir fallas en los sistemas, incluyendo revisiones regulares y ajustes.

Panel Solar: Dispositivo que convierte la luz solar en energía eléctrica, formado por varias células fotovoltaicas.

Patrones de Sombra: Efectos de la sombra de objetos cercanos en la captación de energía solar por parte de paneles fotovoltaicos.

Rehabilitación de Sistemas: Proceso de restaurar la funcionalidad y eficiencia de sistemas de abastecimiento de agua que se han vuelto obsoletos o ineficaces.

SAP (Sistemas de Agua Potable): Sistemas diseñados para suministrar agua potable a comunidades no administradas por ANDA.

Sistema de Bombeo Electromecánico: Tipo de bomba que utiliza energía eléctrica para mover agua, generalmente menos eficiente que las alternativas renovables.

Sistema Fotovoltaico: Conjunto de componentes que convierte la energía solar en energía eléctrica utilizando células solares.

Tarifas de Agua: Costos que los usuarios deben pagar por el suministro de agua potable.

Zonas Rurales: Áreas geográficas situadas fuera de los centros urbanos, generalmente con menor densidad de población y acceso limitado a servicios.

ABREVIACIONES

AES: Servicios de Energía Aplicada

ANDA: Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillado

ASA: Autoridad Salvadoreña del Agua

DEM: Modelo de elevación digital

GHI: irradiación global horizontal

GIS: Sistemas de Información Geográficos

HSP: Horas Sol Pico

JA: Juntas de Agua

KSSI: El Proyecto de Riego Solar para Pequeños Propietarios de Kenia

LGRH: Ley General de los Recursos Hídricos

MARN: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

ONG: Organizaciones No Gubernamentales

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PIB: Producto Interno Bruto

SAP: Sistema de Agua Potable

SFVBA: sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua

SICA: Sistema de Integración Centroamericana

SNET: Servicio Nacional de Estudios Territoriales

SWERA: Solar And Wind Energy Resource Assessment

TIR: Tasa Interna de Retorno

UCA: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas

VAN: Valor Actual Neto

RESUMEN

El acceso al agua potable es un derecho fundamental que muchas comunidades rurales de El Salvador enfrentan con grandes dificultades debido a los altos costos energéticos de los sistemas de bombeo convencionales. Un gran porcentaje de los habitantes rurales no tienen acceso directo a agua potable, y los sistemas que operan con bombeo eléctrico suelen ser costosos y poco sostenibles. La falta de acceso a soluciones energéticas renovables limita el desarrollo social y económico de estas comunidades, generando inequidades en el acceso a servicios básicos.

En este contexto, el presente proyecto busca evaluar la factibilidad de implementar sistemas solares fotovoltaicos para alimentar los sistemas de bombeo, reduciendo así los costos operativos y mejorando el acceso al agua potable. Para ello, se seleccionaron cuatro sitios de interés: Caserío San Antonio La Labor, Caserío Casa Blanca, Caserío Aguacayo y Montañita, y Distrito El Sauce.

Se realizaron visitas de campo a los cuatro sitios seleccionados. Durante estas visitas, se recopiló información sobre los sistemas de bombeo existentes, las condiciones geográficas y climáticas, y el consumo de energía actual. Adicionalmente, se efectuó un análisis del recurso solar disponible utilizando datos de irradiancia proporcionados por bases de datos meteorológicas.

Posteriormente, se diseñaron sistemas fotovoltaicos optimizados para cada comunidad empleando el software PVSyst, considerando dos modelos: sistemas conectados a red y sistemas independientes dependiendo de las necesidades de cada comunidad en cuestión. Finalmente, se llevó a cabo un análisis económico detallado, incluyendo un estudio de sensibilidad para evaluar el impacto de variaciones en los costos de inversión y tarifas energéticas sobre la viabilidad de los proyectos.

Los resultados obtenidos indican que ambos modelos de sistemas solares fotovoltaicos son viables técnica y económicamente. Las tasas internas de retorno (TIR) y los valores actuales netos (VAN) son positivos en la mayoría de los escenarios considerados. El análisis de sensibilidad confirma que, incluso ante un incremento en ciertos porcentajes en los costos de inversión (provocado por las tasas de interés), los proyectos mantienen su viabilidad.

En el aspecto social, la implementación de estos sistemas permitirá reducir significativamente los costos del servicio de agua, beneficiando a más de 3,000 habitantes en total. Además, el uso de energía renovable contribuirá a la disminución de emisiones de carbono.

El estudio demuestra que la instalación de sistemas solares fotovoltaicos para bombeo de agua en comunidades rurales de El Salvador es una solución viable y sostenible. Se espera que los resultados obtenidos sirvan de referencia para futuras iniciativas de inversión y promuevan el uso de energías renovables en sectores vulnerables del país.

INTRODUCCIÓN

El Salvador tiene un sistema de distribución de agua potable a los usuarios a través de dos actores, uno, y el principal, es la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), el otro son los Sistemas Administradores de Agua Potable (SAP). Estos últimos, son, en su mayoría, sistemas autónomos que han operado históricamente sin ningún apoyo del estado. No es hasta la entrada en vigor de la Ley General de Recurso hídricos que las SAPs tienen reconocimiento para el Estado a través del Art. 41 que define las “Juntas de Agua” como organizaciones sin fines de lucro que brindan servicio de distribución de agua potable y garantizan el saneamiento para comunidades.

Las Juntas de Agua, han carecido, históricamente, de un apoyo técnico que permita dar sostenibilidad a los sistemas que administran; esto ha dado como resultado servicios ineficientes a los usuarios del agua (VIELCA, 2015). Es ante esta realidad que surge la necesidad de ofrecer soluciones que puedan mejorar los sistemas de agua potable de las Juntas de Agua, principalmente en las zonas rurales. La apuesta de este trabajo de graduación es realizar un levantamiento en campo de la situación de 4 Juntas de Agua a lo largo del país que abastecen al menos a 7 comunidades rurales, identificar puntos de mejora, proponer diseños con tecnología solar fotovoltaica para reducir costos asociados al bombeo y proponer mejoras hidráulicas para aumentar el tiempo de acceso al agua en estos sistemas, todo acompañado de su estudio económico para potenciales implementaciones.

Este documento comienza describiendo la situación de las Juntas de Agua o SAPs en El Salvador; continua con la descripción de las visitas de campo realizadas a las comunidades objeto de estudio; luego, se presenta un estudio del recurso solar disponible por sitio y se plantea una metodología usando Sistema de Información geográfica (SIG) para identificar el mejor sitio para ubicar paneles solares; posteriormente, se plantea una

estrategia de mejora para cada sitio, llegando a la conclusión que existen dos modelos “tipo” de sistemas que pueden aplicarse, sistemas solares conectado a la red que alimenta únicamente la/las bombas o sistemas solares totalmente independientes de la red. Finalmente, se realizar un estudio económico que pretende dar un estimado del costo de inversión de los sistemas propuestos.

1. Generalidades

1.1. Antecedentes y justificación

Con base al diagnóstico del subsector de agua potable rural de El Salvador ejecutado por ANDA y la Cooperación Española en el año 2016, se sabe que existe un 26.43% de habitantes de zonas rurales que no tienen acceso a servicios de abastecimiento de agua, siendo el acarreo la principal forma de abastecimiento. El resto de la población rural poseen sistemas de abastecimiento por bombeo electromecánico o gravedad. Hablando específicamente de las zonas rurales que cuentan con sistemas de abastecimiento de agua, se pueden mencionar algunos problemas:

- El 31% están entrando a una condición crítica de funcionamiento, siendo aquellos que se encuentran en el rango de 10 a 20 años sin que hayan realizado ningún tipo de rehabilitación. Los sistemas en el rango de más de 20 años podrían ser considerados completamente obsoletos (VIELCA, 2015).
- Existen altos costos de operación de los sistemas de bombeo utilizados para extracción y distribución de agua potable en zonas rurales, esto debido en gran medida al inadecuado mantenimiento y deficiente administración de las Asociaciones Comunitarias. Dicha situación conlleva a tarifas elevadas a pagar por el usuario final, racionamiento de agua a suministrar a las comunidades y aumento de enfermedades al buscar fuentes de abastecimiento de agua insalubres (VIELCA, 2015).
- Del total de sistemas de distribución agua, el 57.33% lo hacen con Sistemas de Bombeo y un 35.61% lo hacen con Gravedad, es decir, más de la mitad de los SAPs (Sistemas de Agua Potable y Saneamiento no administrado por

ANDA) en el país utilizan sistemas de bombeo (VIELCA, 2015). De estos, un 40% paga más de \$5 adicionales a la tarifa por el funcionamiento de los sistemas.

Alrededor del mundo, se han buscado alternativas para superar el problema de abastecimiento de agua potable en zonas rurales. Una alternativa que ha tomado fuerza en los tiempos recientes es la implementación de sistemas de bombes alimentados mediante energía solar fotovoltaica. Como lo expresa Guiqiang et al. 2017, los sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua ha sido un campo de investigación desde hace más de 15 años. Estos sistemas son una de las aplicaciones de energía solar más atractivas desde el punto de vista económico, con sistemas instalados que han demostrado brindar 20 años o más de servicio confiable (Kunen et al., 2015).

El propósito del presente Trabajo de Graduación es evaluar la factibilidad técnica y económica de implementar sistemas solares fotovoltaicos para el bombeo de agua en zonas rurales considerando que El Salvador posee niveles de irradiancia solar favorables y existe un amplio porcentaje de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento Rurales no administrados por ANDA (SAPS) que utilizan bombeo electromecánico para la obtención de agua potable. Se pretende que este análisis sea útil para servir como justificante para la instalación de este tipo de sistemas y así reducir los costos del servicio de agua potable al usuario final en zonas rurales.

1.2. Planteamiento del problema

Durante el 2015, la Gerencia de Atención a Sistemas y Comunidades Rurales de la ANDA, con el apoyo financiero de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, realizó el catastro georreferenciado

de sistemas rurales no administrados por ANDA, con la finalidad de contar con información actualizada sobre el número de sistemas rurales y pequeños operadores municipales funcionando al nivel nacional, de los cuales fueron catastrados 2,325.0 sistemas de abastecimiento de agua potable; se estima que estos sistemas representan entre el 95 y 98% del total de sistemas existentes (VIELCA, 2015).

Según la información disponible, los cinco departamentos con mayor cantidad de sistemas rurales no administrados por ANDA (SAPS) son: Chalatenango (292), Sonsonate (288), Morazán (223), San Miguel (214) y La Unión (203). Todos los sitios mencionados anteriormente poseen niveles de irradiancia promedio anual entre 4.56 y 4.98 kWh/m² (Cortéz et al. 2014) con los cuales es posible el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica para poder reemplazar los sistemas de bombeo tradicional alimentados con líneas de transmisión con sistemas solares fotovoltaicos conectados a red con el objetivo de reducir costos asociados al consumo de energía eléctrica de las estaciones de bombeo y reducir el costo de la factura del consumidor final.

Es importante mencionar los elevados costos del agua para comunidades rurales y de escasos recursos, que, según el SICA y consultas realizadas en una comunidad del departamento de Cabañas, el promedio del costo del servicio de agua potable ronda los \$6.22/mes, lo cual representa un costo considerable para una familia de escasos recursos (SICA, 2013).

La repartición justa del recurso hídrico es un problema actual que afecta a las personas más necesitadas alrededor del mundo. Como se mencionó anteriormente, la implementación de sistemas de bombeo alimentados por

energía solar fotovoltaica ha sido una solución viable técnica y económicamente en diversos países alrededor del mundo.

Para poder implementar este tipo de solución en El Salvador, es necesario tener un punto de partida y evaluar la factibilidad de la implementación de este tipo de tecnología a nivel nacional y, por tanto, este Trabajo de Graduación pretende dar respuesta a la siguiente interrogante: ¿Es factible técnica y económicamente la instalación de sistemas solares fotovoltaicos para alimentar sistemas de bombeo en las zonas rurales de El Salvador? Los resultados obtenidos servirán como base a las instituciones financieras, gubernamentales u ONG para apostar por este tipo de tecnología de bajo impacto ambiental al momento de instalar sistemas de bombeo en comunidades rurales y así reducir el costo del servicio al usuario final.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la factibilidad técnica y económica de la implementación de sistemas de bombeo solar fotovoltaicos aplicado a comunidades rurales autoabastecidas de agua potable con base al área de captación solar mínima requerida respecto a la demanda de agua de las comunidades objeto de estudio.

1.3.2. Objetivo específico

- Caracterizar los sistemas de bombeo de comunidades rurales autoabastecidas de agua potable para la aplicación de sistemas de bombeo con tecnología fotovoltaica.
- Determinar disponibilidad del recurso solar enfocándose en zonas seleccionadas para el estudio.

- Proponer diseños tipo optimizados de sistemas de bombeo fotovoltaicos enfocados a cubrir la demanda de energía eléctrica de las comunidades seleccionadas.
- Determinar los costos de inversión de la aplicación de los sistemas de bombeo con energía fotovoltaicos según la capacidad requerida.

2. Marco referencial

2.1. Sistemas de bombeo a base de energía solar fotovoltaica en áreas rurales alrededor del mundo.

Según datos de la ONU (2015) en todo el mundo, una de cada tres personas no tiene acceso a agua potable salubre, dos de cada cinco personas no disponen de una instalación básica destinada a lavarse las manos con agua y jabón, y más de 673 millones de personas aún defecan al aire libre. La pandemia de la COVID-19 ha puesto de manifiesto la importancia vital del saneamiento, la higiene y un acceso adecuado a agua limpia para prevenir y contener las enfermedades.

Los países en vías de desarrollo son los principales afectados en el tema de acceso a agua potable, atacando específicamente a las zonas rurales de escasos recursos. Uno de los principales problemas es el acceso a la fuerza motriz (electricidad, combustible fósil) para extracción y distribución de agua a comunidades rurales. En la actualidad, el mundo se basa en un uso excesivo e imprudente de los combustibles fósiles para impulsar la sociedad industrial. Estos combustibles fósiles son recursos energéticos limitados y no renovables que pueden tomar millones de años para reponer, pero la demanda de energía por otro lado, aumenta día por día. Es una forma de crisis energética (Li et al., 2017).

Ante esta realidad, es necesario una repuesta desde la ciencia y tecnología para aumentar el índice de acceso a agua potable mundialmente haciendo uso de las energías renovables. Una alternativa que ha tomado fuerza en los tiempos recientes es la implementación de sistemas de bombes alimentados mediante energía solar fotovoltaica. Como lo expresa Guiqiang et al. 2017, los sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua ha sido un campo de investigación desde hace más de 15 años. En la década de 1970, comenzaron los esfuerzos para explorar y estudiar la factibilidad de implementación de los sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua (de ahora en adelante SFVBA) (Li et al., 2017). Un SFVBA básicamente es una combinación de un sistema fotovoltaico para generación de energía eléctrica conectado a un sistema de bombeo de agua. Estos sistemas son una de las aplicaciones de energía solar más atractivas desde el punto de vista económico, con sistemas instalados que han demostrado brindar 20 años o más de servicio confiable (Kunen et al., 2015).

Dos son las principales aplicaciones de los SFVBA: para sistemas de riego y para extracción y distribución de agua a comunidades. Muchos países alrededor del mundo están explotando el bombeo solar y han demostrado la factibilidad técnica y económica de estos sistemas:

Kenya: La agricultura representa la mayor parte del PIB de Kenia (25 %), pero solo el 6 % de las tierras agrícolas son de regadío. El Proyecto de Riego Solar para Pequeños Propietarios de Kenia (KSSI por sus siglas en inglés) tiene como objetivo mejorar la calidad de los sistemas SFVBA en Kenia mientras facilita un aumento en las ventas comerciales a los pequeños agricultores que se benefician al eliminar el uso del costoso combustible diésel. Muchos agricultores

de este país optan por implementar sistemas de bombeo solar a pesar que tienen acceso a red eléctrica (Kunen et al., 2015).

Indonesia: Ahmad et al. 2014, presentan el diseño e instalación de un sistema SFVBA como una aplicación de la energía renovable para solventar el problema de abastecimiento de agua a la comunidad Purwodadi en el distrito de Tepus, Indonesia. Este sistema es capaz de llevar agua a través de 1,400 metros horizontales con una carga dinámica total de 218.34 metros. Este sistema utiliza 32 módulos fotovoltaicos para producir 3.2 kWp que son utilizados para operar dos bombas sumergibles de 250 metros de carga dinámica total. El caudal es aproximadamente de 0.4 – 0.9 L/s (Setiawan et al., 2014). El tipo de tecnología empleada en este caso de estudio fueron bombas sumergibles (modelo Lorentz PS1800 HR-05HL) y paneles fotovoltaicos de silicio cristalino.

Etiopía: La disponibilidad de abundante radiación solar y suficientes fuentes de agua subterránea en Etiopía se pueden combinar para hacer que el agua potable esté disponible para las comunidades rurales (Girma et al., 2015). Aprovechando esta ventaja en recursos, se desarrolló un estudio a través del software PVSYST para determinar la factibilidad de implantación de SFVBA en tres comunidades. Como resultado, el sistema diseñado es capaz de suministrar un promedio diario de 10.5, 7 y 6.5 m³/día para 700, 467 y 433 personas en los sitios Siadber y Wayu, Wolmera y Enderta, respectivamente, con un consumo promedio diario de agua de 15 L/persona-día y los costos de agua sin ningún tipo de subsidio, son aproximadamente 0.1, 0.14 y 0.16 \$/m³ por cada sitio respectivamente. Si se utiliza un generador diésel en lugar de un sistema de bombeo solar fotovoltaico, para proporcionar el mismo promedio diario de agua para la comunidad seleccionada, los costos de agua sin ningún subsidio son de,

aproximadamente, 0,2, 0,23 y 0,27 \$/m³ para cada sitio, respectivamente (Girma et al., 2015).

2.2. Sistemas de Agua Potable no administrados por ANDA en El Salvador

Hablando acerca de los sistemas de bombeo en El Salvador hasta el año 2015, se tenía un total aproximado de 2,325 Sistemas de agua potable no administrados por ANDA distribuidos por todo el país siendo los departamentos de Chalatenango, Sonsonate y Morazán en los que se concentraba la mayoría de estos Sistemas (VIELCA, 2015). Esto es evidencia de la gran cantidad de comunidades rurales que dependen de este tipo de sistemas de bombeo y que deben añadir una tarifa adicional a su facturación de agua potable (debido al consumo energético del sistema de bombeo). La distribución de todos estos SAPS hasta el año 2015 se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Mapa de ubicación de SAP's en El Salvador. (VIELCA, 2015)

Además, es importante mencionar que del total de sistemas de distribución agua, el 57.33% lo hacían con sistemas de bombeo y un 35.61% lo hacían con gravedad, es decir, más de la mitad de los SAP's en el país utilizan sistemas de bombeo (VIELCA, 2015). De estos Sistemas de agua potable no administrados por ANDA, un 40% paga más de \$5 adicionales a la tarifa por el funcionamiento de los sistemas.

De estas SAPs distribuidas a lo largo del país, una buena parte (47.31%) abastecen a comunidades pequeñas menores a los 100 habitantes (VIELCA, 2015), lo que quiere decir que al menos 1,225.0 de estos sistemas pertenecen a comunidades mayores a los 100 habitantes.

Entonces, habiendo una gran cantidad de personas y comunidades que hacen uso de sistemas de bombeo para el abastecimiento de agua potable, sería de gran ayuda presentar una alternativa para poder aliviar los costos energéticos que representa el uso de este tipo de sistemas, una solución adoptada en otros países, a nivel mundial pero también en la región es el uso de sistemas fotovoltaicos para la reducción del consumo energético de las plantas de bombeo. En Nicaragua, se ha evaluado y aplicado el uso de este tipo de tecnología para sistemas de riego para actividades agrícolas en comunidades rurales de escasos recursos; el resultado es que la implementación o el presupuesto para este tipo de proyectos tenía un coste de 55,206.0 córdobas (aproximadamente \$1,543.0) para un sistema solar de 21 kWp. Lo que nos indica que es una opción útil para su aplicación en algunas de estas comunidades en la región (Asociación Fénix, 2006).

En el país no se encontraron estudios de aplicación de este tipo de sistemas aplicado para comunidades rurales, solamente estudios a nivel

universitario de la aplicación de este tipo de sistemas para actividades agrícolas en el departamento de Santa Ana (G. Delgado, 2016), sin embargo, por información de otros países a nivel mundial y regional, es una alternativa aplicable para algunas comunidades.

2.2.1. Juntas de Agua en El Salvador

La Asamblea Legislativa de El Salvador aprobó la Ley General de Recursos Hídricos, que entró en vigencia el 12 de julio de 2022. Para el presente trabajo, resalta el artículo 41:

“Art. 41 LGRH: Se entenderá por junta de agua a aquellas organizaciones sociales sin fines de lucro con personería jurídica que tienen por finalidad prestar el servicio de agua potable a la comunidad.

Las juntas de agua en zonas urbanas y rurales, que prestan servicio de agua potable a la población, con el respaldo técnico de las instituciones del Estado correspondiente, deberán respetar el derecho humano al agua y al saneamiento establecido en la presente Ley.

Las juntas de agua relacionadas en el inciso anterior deben garantizar el tratamiento de sus aguas residuales.

El Estado, a través de la ASA, fomentará el desarrollo de las capacidades de las juntas de agua en zonas urbanas y rurales para el cumplimiento de la normativa correspondiente”.

Es la primera vez en la historia de El Salvador que se reconocen los sistemas descentralizados que abastecen agua a los sectores mas vulnerables, principalmente, en zonas rurales.

Desde la entrada en vigor de la LGRH, se ha hecho un trabajo extenso para llegar a los Sistemas de Abastecimiento de Agua no Administrados por ANDA para poder ser reconocidos por ASA. Para esto, la organización debe realizar el proceso para inscribirse en el Registro Nacional de los Recursos Hídricos (RNRH) presentando documentos que comprueben su legalidad, tales como, estatutos de conformación debidamente publicados en el Diario Oficial, credenciales de la Junta Directiva vigentes, acta de constitución de la sociedad, NIT de la organización y completar el formulario respectivo debidamente firmado por el presidente o representante legal.

Posterior a dicho trámite, es necesario que la Junta de Agua inscriba su fuente de abastecimiento de agua, la cual, puede ser un pozo, manantial, río, lago, etc. Para esto, es necesario tener legalmente regulada el terreno donde se encuentra la fuente, ya sea que el mismo este legalmente a nombre de la Junta de Agua o que exista un comodato que el propietario autoriza el uso de la fuente que se encuentra en su terreno.

Finalmente, es necesario solicitar la autorización de uso y aprovechamiento del recurso hídrico. Este es, sin duda, uno de los trámites más importantes ya que es el que garantiza un volumen de agua para la comunidad en el tiempo. Para este trámite es necesario tener información técnica sobre el caudal de la fuente, análisis de calidad de agua nivel intermedio, histórico de consumo en metros cúbicos, frecuencia de extracción y volumen de agua a solicitar.

2.3. Recurso solar en El Salvador

Considerando ahora la disponibilidad del recurso solar en el país, según datos recopilados en 2005 por el MARN en conjunto con la UCA en el estudio

“Determinación del potencial solar y eólico en El Salvador” el promedio anual de radiación solar en el país fue de 4.9 kWh/m²/día (MARN, UCA, 2005).

Cortéz et al. en 2014 realizaron una actualización al mapa de irradiancia de El Salvador en su tesis de grado titulada “Actualización del Mapa de Radiación Solar de El Salvador”. En ella es posible visualizar mapas actualizados de irradiancia y un análisis comparativo con el mapa del proyecto Solar And Wind Energy Resource Assessment (SWERA).

Visualizando el mapa actualizado de irradiancia de El Salvador en la Figura 2, es importante resaltar que las regiones con el mayor potencial de radiación solar son la Nordeste de las regiones central y occidental del país con alrededor de 4 a 5.8 kWh promedio diario. La parte sur de las regiones Central y Oriental presentan también condiciones de gran potencial solar de alrededor de 4.8 a 5.3 kWh promedio diario. La zona de San Salvador presenta el foco máximo de valor de radiación solar anual de 5.8 kWh promedios diario, esto puede deberse a que tiene en su zona mayor concentración de estaciones, por lo que se debe tomar en consideración a la hora de utilizar dichos valores estimados. La parte norte de Usulután, San Vicente, San Miguel y la Unión, presentan en ambos mapas la segunda región con mayor potencial solar del país, alrededor de 4.5 y 5.2 kWh promedio diario (Cortéz et al. 2014).

Los valores de irradiancia en El Salvador consultados desde diversas fuentes confirman que el país cuenta con condiciones de recurso solar muy favorables para poder desarrollar el estudio con éxito.

MAPA DE RECURSO SOLAR

IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL**EL SALVADOR**

ESMAP

SOLARGIS

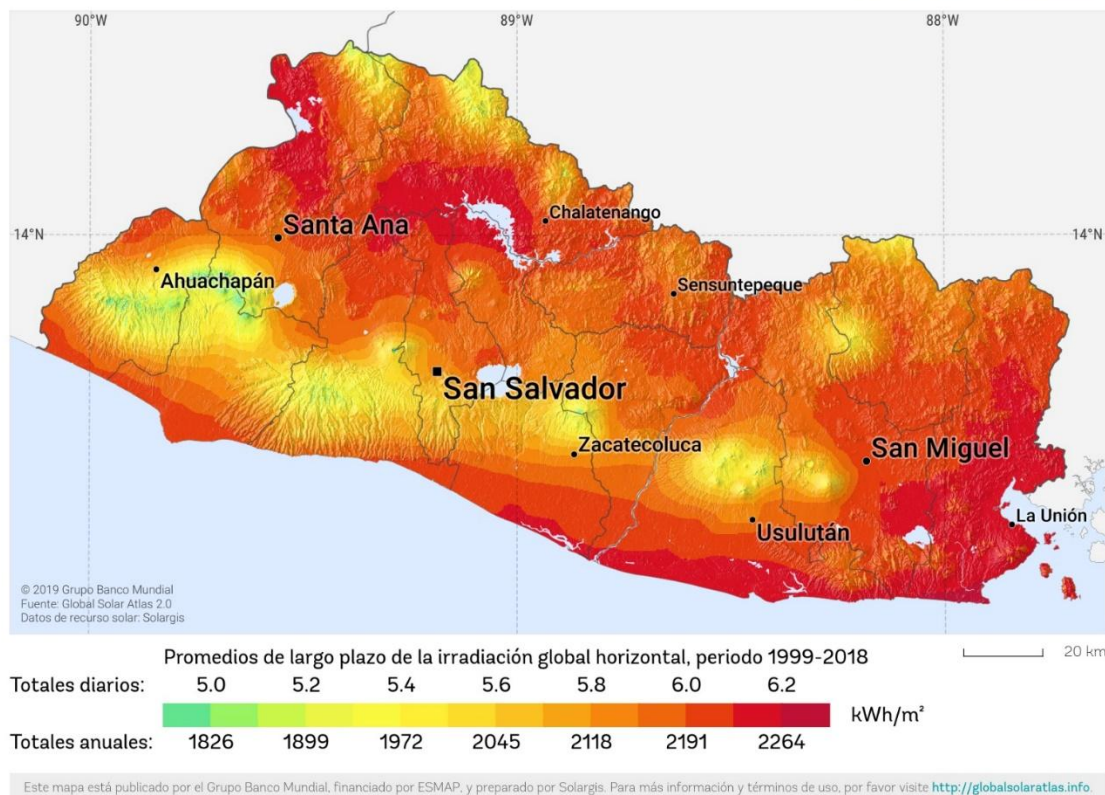


Figura 2. Mapa de irradiancia de El Salvador. (Solar resource map, 2021)

3. Descripción de los sitios

El análisis realizado parte de la visita a diversos sitios para conocer la realidad del sistema de bombeo en sitios no abastecidos por ANDA. Se han visitado cuatro Juntas de Agua a lo largo del territorio nacional para tener mejor distribución de información y evidenciar que existe la urgencia de atender todas las Juntas de Agua del país y, la tecnología solar fotovoltaica es una respuesta para reducir los costos involucrados en la distribución de agua potable además de mejorar la calidad del servicio de abastecimiento. En la figura 3 se pueden ubicar los sitios visitados.



Figura 3. Ubicación de los sitios visitados para el estudio. Elaboración propia.

3.1. Sitio 1: Caserío San Antonio La Labor

3.1.1. Características de la población

La comunidad está ubicada en la zona paracentral, departamento de Cabañas, municipio de Ilobasco. El acceso a la comunidad es por el kilómetro 44 de la carretera que de San Rafael Cedros conduce a Ilobasco. Luego, se toma el desvío al oriente y después de un kilómetro por calle de tierra se llega al caserío La Labor (IBASA, 1995).

La extensión del núcleo de las viviendas es de aproximadamente de 1 km². La topografía del lugar es quebrada, presentando diferencias de niveles de aproximadamente 117 metros entre los puntos más altos y bajos.

Según registros históricos de la comunidad, en febrero de 1996 contaba con 370 habitantes repartidos en 56 viviendas. Según una entrevista llevada a cabo el 20 de mayo de 2023 al Sr. Mardoqueo Cañas (presidente de la directiva

comunal) menciona que no se tiene un dato exacto del número de habitantes actual de la comunidad. Dado dicho inconveniente, se realizará una estimación de la cantidad de personas que probablemente habitan la comunidad a través del método de crecimiento geométrico:

$$P_f = P_a(1 + r)^{t-1996}$$

Donde:

Pf: Población futura en el año "t".

Pa: Población en el año cero (para nuestro caso 1996).

r: tasa de crecimiento geométrico medio en el departamento de cabañas (Según datos del SNET, el crecimiento poblacional para esta región es de 0.49%).

t: año del cálculo.

Según la estimación realizada, se proyecta que en el 2023 la cantidad de habitantes de la comunidad son 422, es decir, un 14% más de lo que existía en 1996.

Finalmente, es importante mencionar, que la principal actividad económica de la comunidad es la agricultura de granos básicos y caña de azúcar en pequeñas parcelas.

Tabla 1. Estimación de la población en el Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.

Año	1996	2006	2016	2023
Habitantes	370	389	408	422
Casas	56	59	62	64

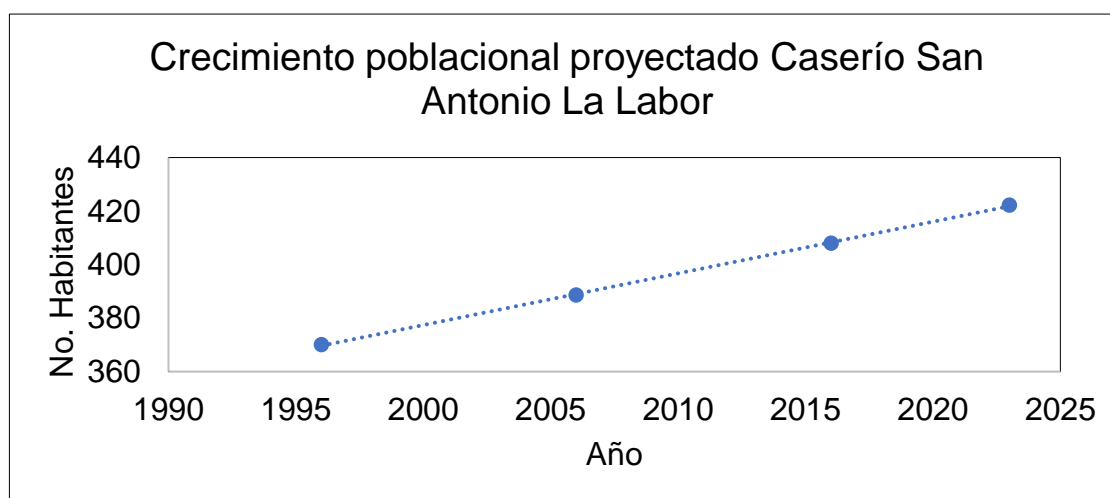


Figura 4. Gráfica del crecimiento poblacional proyectado para el Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.

3.1.2. Situación actual de la distribución de agua potable

El abastecimiento de agua potable a la comunidad se hace a través de un sistema híbrido que utiliza sistema de bombeo y gravedad. Según la entrevista realizada a Don Mardoqueo, en 1995, gracias a la comunidad europea a través de la ONG ABISA, comienza la etapa de estudios y factibilidad para la instalación de un sistema de distribución de agua por bombeo a la comunidad. En 1998, se concluye la construcción de la red de distribución, tanques e instalación de bombas y se hacen las primeras pruebas de distribución. Desde entonces, el sistema ha funcionado para abastecer a las diversas viviendas de la comunidad.

Al revisar la documentación que poseen sobre el diseño del sistema de bombeo, se pueden resaltar los siguientes aspectos:

- El agua parte de la captación y se conduce por gravedad en cañería de hierro galvanizado de 2 pulgadas de diámetro con una longitud total de 18 m hasta el tanque de succión de 8 m³ de volumen útil. Sobre el mismo, se construyó la caseta que protege el equipo de bombeo el que impulsa el agua hacia el tanque de almacenamiento de 15m³ a través de una tubería que tiene una longitud total de 180 m con diámetro de 1 ½ pulgada de PVC 160 psi, luego, la distribución a las viviendas se esperaba fuera por gravedad por la red de distribución. El detalle de los elementos mencionados puede verse en la Figura 5.
- El proyecto fue diseñado para 20 años. Debido a la buena gestión y mantenimiento adecuado que los miembros de la comunidad han dado al sistema de bombeo, este sigue operando y se visualiza que las instalaciones actuales están en muy buen estado y pueden seguir operando normalmente.
- El diseño del sistema fue hecho para 452 personas. Según la proyección geométrica realizada, se puede concluir que el sistema está bien dimensionado incluso para el número de habitantes actuales.
- La dotación de agua por habitante al día considerado es de 80 l/hab./día para abastecer la población considerada por tomas domiciliarias.
- No existe un sistema de contador de caudal de agua en cada punto de entrega. Se paga una cuota fija de \$4.60 lo que incluye: mantenimiento, cloro, pago para la persona encargada de operar las bombas y costo de energía eléctrica. El detalle de costos se puede visualizar en la tabla 3.

Tabla 2. Desglose de ingresos y costos del sistema de administración del agua en Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.

Detalle	Costo mensual	Porcentaje
Ingresos mensuales por cobro del servicio de agua para el año 2023.	\$294.40	100%
Costo de energía eléctrica para la distribución de agua en promedio para el 2023.	\$42.49	15%
Costo mantenimiento, cloro, pago para la persona encargada de operar las bombas.	\$251.91	85%



Figura 5. a) Tubería de hierro galvanizado de 2 pulg. De diámetro. b) Tanque de captación de 8 m³. c) Tanque de captación de 15 m³ para distribución por gravedad. d) Estación de bombeo. Fuente propia.

- Está prohibido utilizar el agua potable para regar siembras y/o para el ganado, no obstante, no tienen forma de medir y controlar esto.

- Actualmente, se bombean 2.5 horas al día. Esto es suficiente para abastecer aproximadamente a 43 familias por tanque de gravedad y unas 13 familias por bombeo electromecánico. Estas últimas familias, solo tienen disponibilidad de agua aproximadamente 4 horas al día, el resto tienen acceso al agua 24 horas al día.
- Se tienen instaladas dos bombas de 5 HP con caudal de bombeo de 16 gpm.
- Se observó que los alrededores del tramo cercano a la línea de distribución de energía eléctrica para el sistema de bombeo están rodeados de cerros y laderas (Figura 6), lo cual se tomará en cuenta para el dimensionamiento del sistema solar.
- La energía eléctrica es distribuida a la zona por la empresa distribuidora AES CAESS.

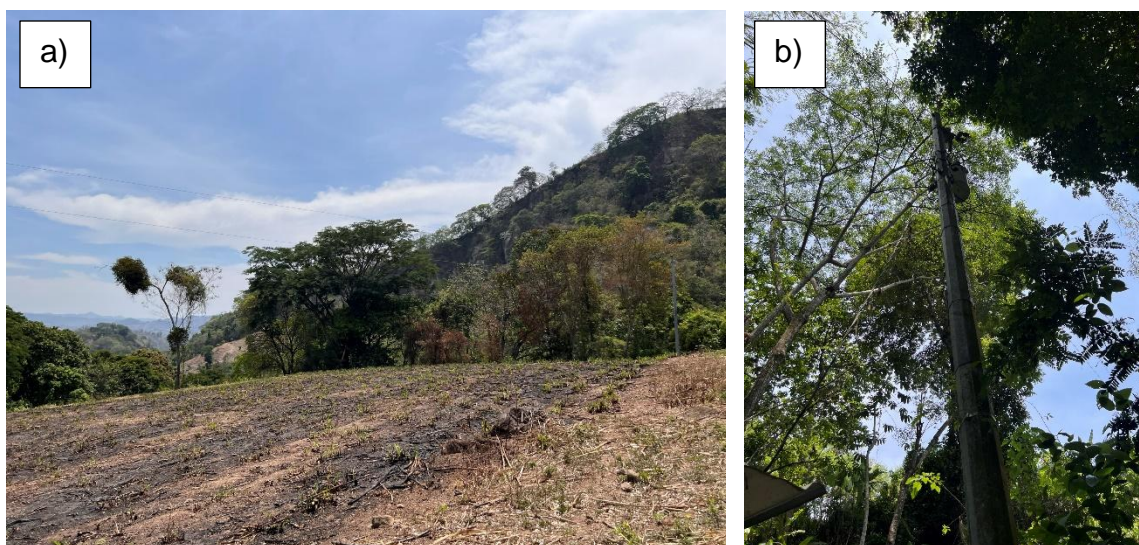


Figura 6. a) Topografía del terreno próximo a la línea de distribución eléctrica. b) Acometida eléctrica para la estación de bombeo. Fuente propia.

3.2. Sitio 2: Caserío Casa Blanca

3.2.1. Características de la población

La comunidad está ubicada en la zona occidental, departamento de Santa Ana, municipio Santa Ana Este, distrito de Coatepeque. El acceso a la comunidad es sobre la calle principal al lago de Coatepeque SAN24E. Los límites del caserío, aproximadamente, van desde la casa comunal mostrada en la Figura 11 hasta el restaurante Rancho Alegre situado sobre la misma calle¹.

La extensión del núcleo de las viviendas es de aproximadamente de 0.5 km². La topografía del lugar es quebrada, el caserío se encuentra en la parte NE dentro del borde calderico de Coatepeque.

Según información proporcionada por el Sr. Salvador Alvarado, encargado del manejo del sistema de bombeo, en el año 2003 la comunidad contaba con 39 familias y que en el 2024 se estima que existen 90 familias. A través del método de crecimiento geométrico, es posible realizar una estimación del ritmo de crecimiento de la población en la comunidad en estudio:

$$P_f = P_a(1 + r)^{t-2003}$$

¹ Información obtenida por transmisión oral resultado de la visita de campo y entrevista sostenida con el Sr. Salvador Alvarado, encargado del manejo del sistema de bombeo del Caserío.

Tabla 3. Estimación de la población en el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.

Año	2003	2006	2016	2024
Habitantes	197	222	329	450
Casas	39	44	66	90

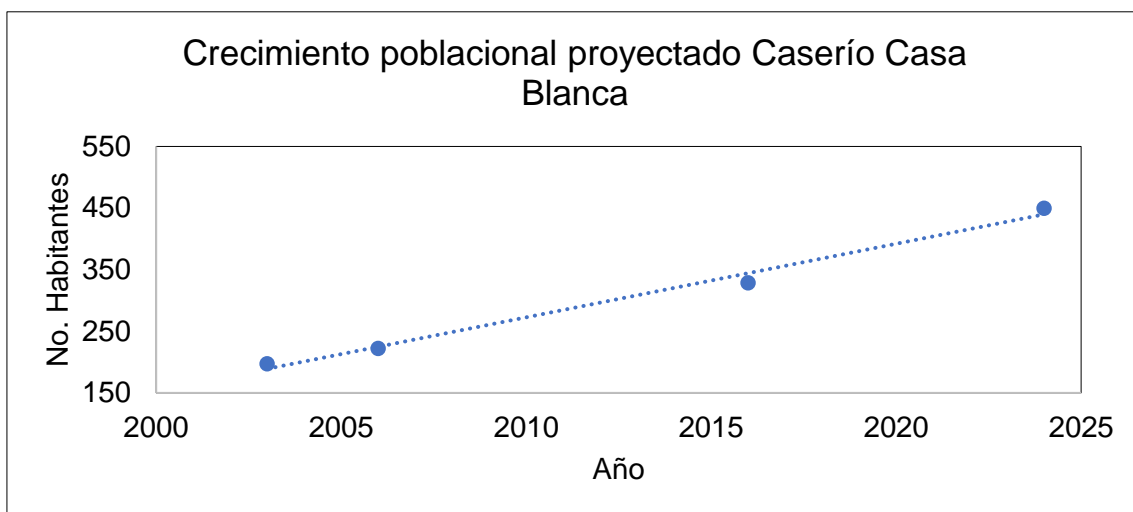


Figura 7. Gráfica del crecimiento poblacional proyectado para el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.

Según la estimación realizada, se estima que la tasa de crecimiento que ha tenido la comunidad es del 4.0%.

Finalmente, es importante mencionar que la principal actividad económica de la comunidad es la pesca y agricultura de frijol y maíz.

3.2.2. Situación actual de la distribución de agua potable

El abastecimiento de agua potable a la comunidad se hace a través de un sistema híbrido que utiliza sistema de bombeo y gravedad. Según la entrevista realizada al Sr. Alvarado, en el año 2000 se construyó y puso en funcionamiento el sistema de distribución de agua que tienen en la actualidad.

De forma puntual, las especificaciones del sistema de bombeo se presentan a continuación:

- Bomba sumergible de 5 hp, 220 V. La selección de la potencia de la bomba se realizó con base a experiencia empírica de quienes administran el sistema, no obstante, carecen de un dimensionamiento adecuado y documentado. La fuente de agua es directamente del lago de Coatepeque como se visualiza en la figura 8.
- Actualmente, se bombean 3.5 horas al día. Este tiempo es suficiente para llenar el tanque elevado de 175 barriles (27 822.7 litros), el cual, al vaciarse deja sin posibilidad de acceso al agua a los habitantes de la comunidad.
- No poseen ningún tipo de macro o micro medición.
- Con base a mediciones con GPS, se determinó que la distancia vertical desde el nivel del lago hasta el tanque es de 91 m.

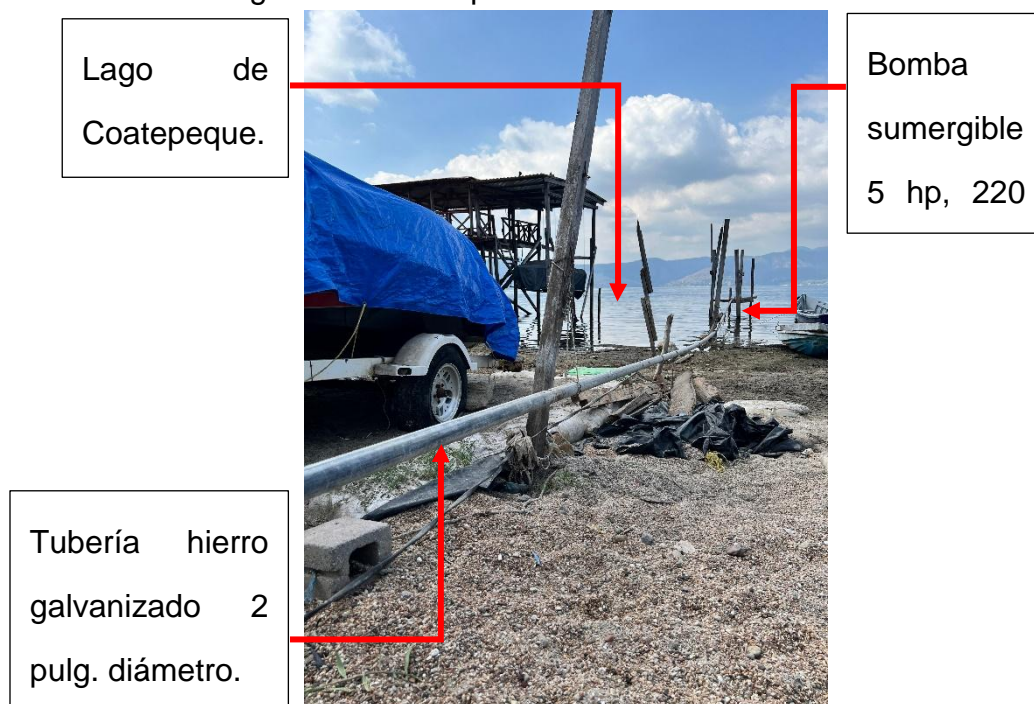


Figura 8. Descripción del sistema de bombeo actual en el Caserío Casa Blanca. Fuente: propia.

- No existe un sistema de contador de caudal de agua en cada punto de entrega. Se paga una cuota fija de \$7.00 lo que incluye: mantenimiento, pago para la

persona encargada de operar las bombas y costo de energía eléctrica. En la Tabla 4 se desglosan los ingresos y costos que tiene la administración.

Tabla 4. Desglose de ingresos y costos del sistema de administración del agua en Caserío Casa Blanca. Elaboración propia con base a entrevista realizada.

Detalle	Costo mensual	Porcentaje
Ingresos mensuales por cobro del servicio de agua para el año 2023.	\$630.00	100%
Costo de energía eléctrica para la distribución de agua en promedio para el 2023.	\$325.90	52%
Costo mantenimiento, pago para la persona encargada de operar las bombas.	\$304.10	48%

- La comunidad no realiza ningún tipo de procesamiento de clorado al agua a pesar de la variabilidad en pureza que pueda presentar el agua del lago a lo largo del año.
- En el año 2023, se finaliza la instalación de “White box” y un sistema de osmosis inversa que se puede ver en la Figura 9. El primero, es un sistema de ultrafiltración, que utiliza agua del lago y, a través de un sistema de 16 filtros, depura el agua. El segundo, toma el agua filtrada de la White Box y continúa su proceso de purificación, remineralización y desinfección con luz ultravioleta (ASA, 2023).

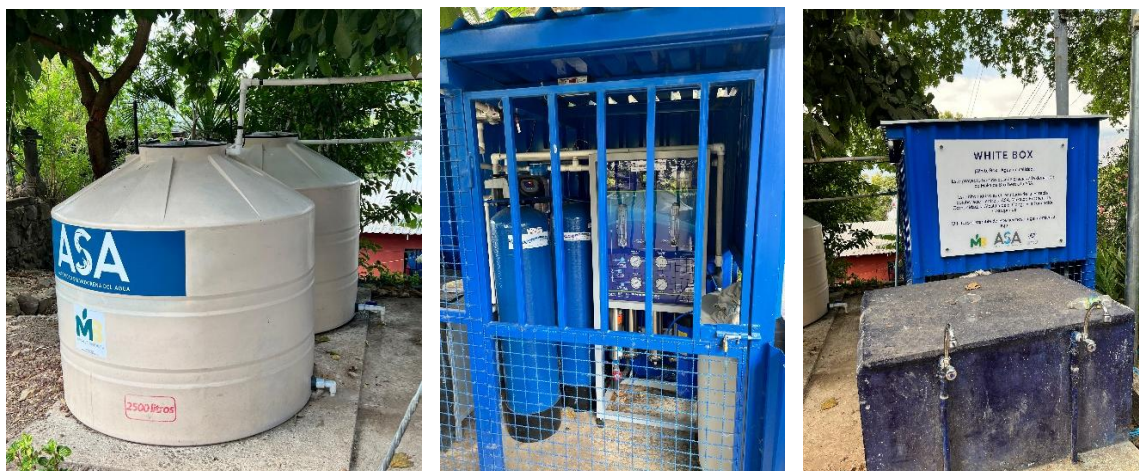


Figura 9. Sistema de filtración White box y purificación por osmosis inversa para la comunidad. Fuente: propia.

- La comunidad cuenta con una instalación para el filtrado de agua de partículas sólidas por gravedad que se encuentra justo antes de la entrada al tanque elevado como se muestra en la Figura 10. No obstante, el sistema de filtrado fue mal dimensionado y no se utiliza.
- Se observó que los alrededores del tramo cercano a la línea de distribución de energía eléctrica para el sistema de bombeo están rodeados de cerros y laderas, lo cual, se tomará en cuenta para el dimensionamiento del sistema solar.
- La energía eléctrica es distribuida a la zona por la empresa distribuidora AES CLESA.

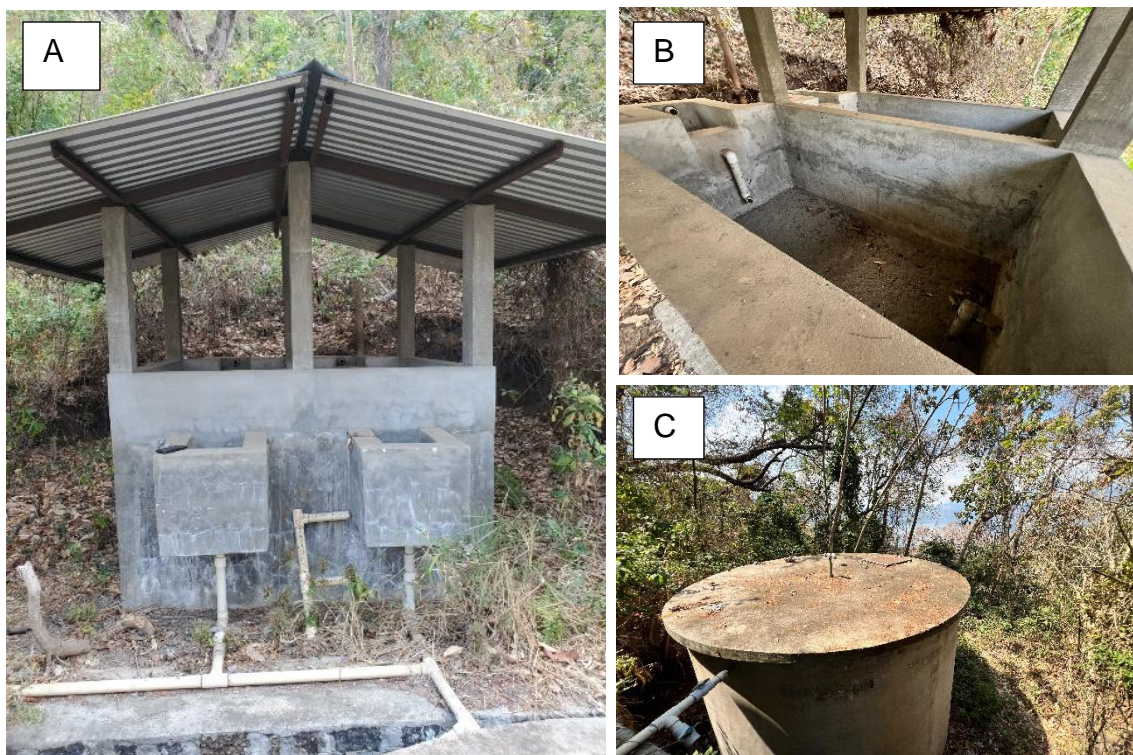


Figura 10. A) vista frontal del sistema de filtrado de partículas por gravedad; B) interior del sistema de filtrado; C) Tanque de captación de 175 barriles (27 822.7 litros). Fuente: propia.

3.3. Sitio 3: Caserío Aguacayo y Montañita

3.3.1. Características de la población

La comunidad está ubicada en la zona central, departamento de Chalatenango, municipio Chalatenango centro, distrito de La Reinita. El acceso a la comunidad es sobre la Carretera Troncal del Norte, aproximadamente 6 km al oeste del desvío “Las Peñas”.

La extensión del núcleo de las viviendas es de aproximadamente de 1.30 km². La topografía del lugar es montañosa, el caserío se encuentra en la zona de montañas pertenecientes al periodo terciario, geológicamente hablando, donde no existe ningún tipo de actividad volcánica.

Según información proporcionada por la Sra. Guadalupe Maldonado y el Sr. Juan Hernandez, miembros de la junta directiva de la Junta de Agua local, en el 2024 se estima que existen 342 habitantes en el año 2024 y que en el año 2003 eran aproximadamente 278 habitantes. A través del método de crecimiento geométrico, es posible realizar una estimación del ritmo de crecimiento de la población en la comunidad en estudio:

$$P_f = P_a(1 + r)^{t-2003}$$

Tabla 5. Estimación de la población en el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.

Año	2003	2006	2016	2024
Habitantes	278	286	316	342
Casas	107	110	122	132

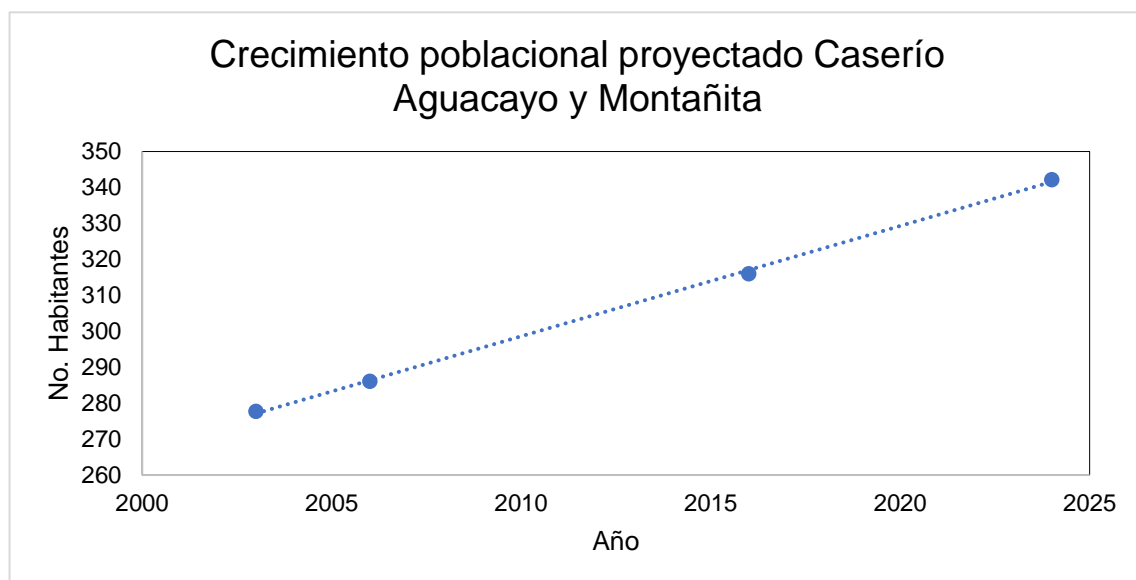


Figura 11. Gráfica del crecimiento poblacional proyectado para el Caserío Aguacayo y Montañita. Elaboración propia.

Según la estimación realizada, se estima que la tasa de crecimiento que ha tenido la comunidad es del 1.0%.

Finalmente, es importante mencionar que la principal actividad económica de la comunidad es la ganadería a pequeña escala y agricultura de granos básicos.

3.3.2. Situación actual de la distribución de agua potable

Las comunidades Aguacayo y Montañita desde el año 2018 poseen un sistema de distribución de agua potable extraída de pozo hacia dos tanques elevados para la posterior distribución. El proyecto fue llevado a cabo gracias a la colaboración de toda la comunidad y de las organizaciones FEDEVAC y SOLIDAR.

De forma puntual, las especificaciones del sistema de bombeo se presentan a continuación:

- Una bomba sumergible de 10 HP, monofásica, 240V. La comunidad pone en funcionamiento la bomba de 4 a 6 horas diarias entre las 5:00 am hasta medio día. En la figura 12 se observan las instalaciones de la casa de máquina.



Figura 12. A) Pozo de extracción de agua. B) Casa de control eléctrico. C) Acometida eléctrica. Elaboración propia.

- El agua es transportada por tuberías de acero de 3 pulgadas de diámetro hasta dos tanques elevados. Cada tanque tiene una capacidad de 49 m³ y se encuentran a 80 m y 130 m arriba del pozo. En la figura 13 se pueden apreciar los tanques y tuberías.

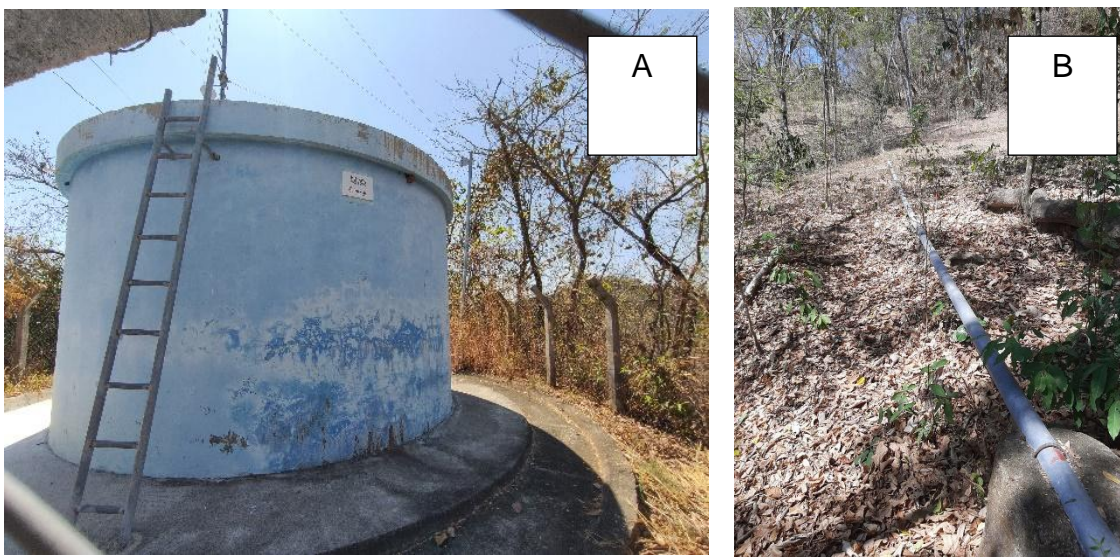


Figura 13. A) Tanque de captación de agua. B) Tubería de acero de 3 pulg de diámetro para el transporte de agua. Elaboración propia.

- El sistema de bombeo cuenta con medidores del caudal consumido para cada familia que utiliza el sistema. El pliego tarifario que utiliza la comunidad para el cobro del servicio se detalla en la tabla 6.

Tabla 6. Pliego tarifario para el cobro de agua en las comunidades Aguacayo y Montañita. Fuente: elaboración propia con base a entrevista realizada.

Rango de consumo (m ³)	Precio (\$/m ³)
Hasta 5	\$1.00
De 5 a 15	\$1.50
Mas de 15	\$2.00

- El cobro de agua para cada familia incluye el costo de energía eléctrica que consume la bomba sumergible, mantenimiento, salario de la persona encargada del bombeo y de la persona encargada de leer los contadores. El detalle de los costos por energía eléctrica se detalla en la tabla 7.

Tabla 7. Desglose de ingresos y costos del sistema de administración del agua en Caserío Aguacayo y Montañita. Elaboración propia

Detalle	Costo mensual	Porcentaje
Ingresos mensuales por cobro del servicio de agua para el año 2023.	\$1,461.00	100%
Costo de energía eléctrica para la distribución de agua en promedio para el 2023.	\$402.96	28%
Costo mantenimiento, pago para la persona encargada de operar las bombas y de lectura de contadores.	\$1,058.04	72%

- Debido a la gestión que las comunidades le dan al sistema de bombeo, todas las familias tienen acceso al agua 24 horas al día los 7 días de la semana.
- La comunidad realiza proceso de clorado al agua antes de distribuirla a los puntos de entrega.
- Se observó que los alrededores del tramo cercano a la línea de distribución de energía eléctrica para el sistema de bombeo están rodeados de cerros y laderas, lo cual, se tomará en cuenta para el dimensionamiento del sistema solar.
- La facturación es realizada por AES CAESS.

3.4. Sitio 4: Distrito El Sauce

3.4.1. Características de la población

El poblado está ubicado en la zona oriental, departamento de La Unión, municipio La Unión Norte, distrito de El Sauce. El acceso a la comunidad es sobre la carretera Longitudinal del Norte, aproximadamente a 11 km al Noreste de la ciudad de Santa Rosa de Lima.

La extensión del núcleo de las viviendas es de aproximadamente de 0.5 km². La topografía del lugar es montañosa con amplias áreas para la ganadería.

Según información proporcionada por el Sr. Ulises Velásquez, miembro de la Junta Directiva que administra el sistema de bombeo, en el año 2012 la comunidad contaba con 290 viviendas (1,490.0 personas) y que en el 2024 se estima que existen 400 viviendas (2056 personas). A través del método de crecimiento geométrico, es posible realizar una estimación del ritmo de crecimiento de la población en la comunidad en estudio:

$$P_f = P_a(1 + r)^{t-2003}$$

Tabla 8. Estimación de la población en el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.

Año	2012	2016	2020	2024
Habitantes	1490	1659	1847	2056
Casas	290	323	359	400

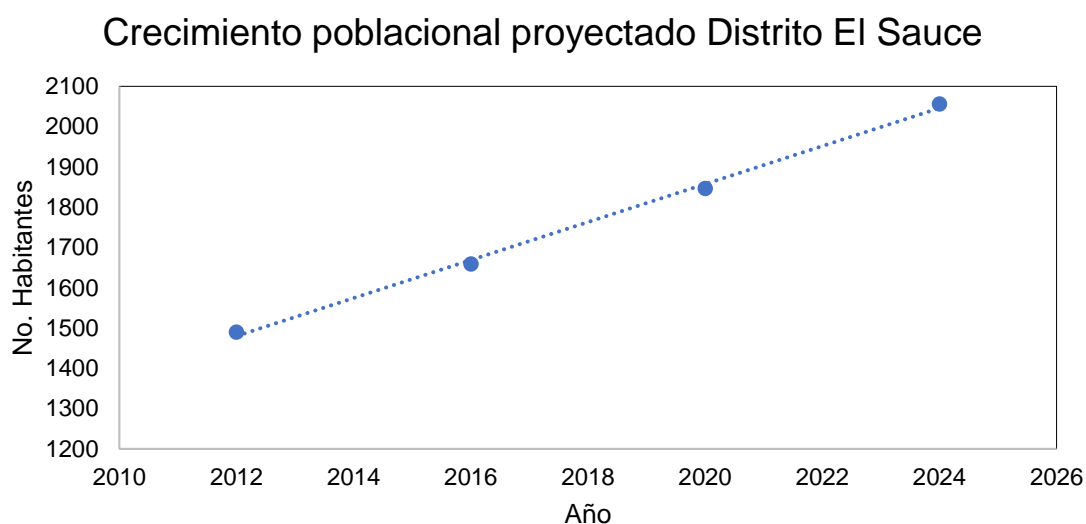


Figura 14. Crecimiento poblacional en Distrito El Sauce. Elaboración propia.

Según los cálculos realizada, se estima que la tasa de crecimiento que ha tenido la comunidad es del 2.72%.

Finalmente, es importante mencionar que la principal actividad económica de la comunidad es la agricultura y ganadería a pequeña escala.

3.4.2. Situación actual de la distribución de agua potable

El poblado de El Sauce desde el año 2012 poseen un sistema de distribución de agua potable extraída de pozo hacia dos tanques elevados para la posterior distribución. El proyecto fue llevado a cabo gracias a la colaboración de toda la comunidad y de la organización “Desarrollo juvenil comunitario”.

De forma puntual, las especificaciones del sistema de bombeo se presentan a continuación:

- Una bomba sumergible de 15 HP, monofásica, 240V. La comunidad pone en funcionamiento la bomba 7 horas diarias entre las 5:00 am hasta medio día. En la figura 15 se observan las instalaciones de la casa de máquina.



Figura 15. A) Pozo de extracción de agua. B) Casa de control eléctrico. C) Acometida eléctrica de Distrito El Sauce. Elaboración propia.

- El agua es transportada por tuberías de acero de 4 pulgadas de diámetro hasta dos tanques elevados. El primer tanque tiene una capacidad de 111 m³

y está ubicado a 44.5 m de altura respecto a la estación de bombeo, este cuenta con sensor de nivel para control automático de la bomba. El segundo tanque tiene una capacidad de 190 m³ y está ubicado a -21.8 m de altura respecto a la estación de bombeo y no posee sensor de nivel. En la figura 16 se pueden apreciar los tanques y tuberías.

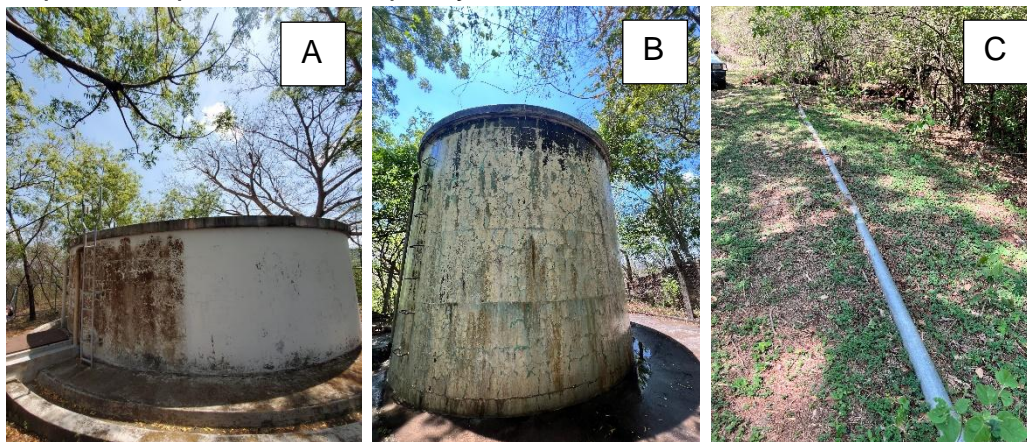


Figura 16. A) Tanque de captación de agua de 111 m³ B) Tanque de captación de agua de 190 m³. C) Tubería de acero de 4 pulg. de diámetro para el transporte de agua de Distrito El Sauce. Elaboración propia.

- No cuentan con medición de caudal en cada punto de entrega, no obstante, tienen un sistema de cobro diferenciado que se detalla en la tabla 9.

Tabla 9. Pliego tarifario para el cobro de agua en las comunidades Aguacayo y Montañita. Fuente: elaboración propia con base a entrevista realizada.

Descripción	Precio (\$/vivienda al mes)
Vivienda deshabitada	\$3.00
Vivienda con pila (de cualquier capacidad)	\$8.00
Vivienda con pila y tanque (de cualquier capacidad)	\$9.00

- El cobro de agua para cada familia incluye el costo de energía eléctrica que consume la bomba sumergible, mantenimiento, salario de la persona encargada del bombeo. El detalle de los costos por energía eléctrica se detalla en la tabla 10.

- El sistema de distribución de agua potable se encuentra sectorizado. Se ha dividido al Distrito en tres zonas, el sistema solo es capaz de proporcionar agua a una zona cada 2 días, por tanto, cada familia debe coleccionar tanta agua como sea necesaria para disponer del vital líquido durante los días que no tienen disponible agua en sus viviendas.

Tabla 10. Desglose de ingresos y costos del sistema de administración del agua en Caserío Aguacayo y Montañita. Elaboración propia

Detalle	Costo mensual	Porcentaje
Ingresos mensuales por cobro del servicio de agua para el año 2023.	\$3,200.00	100%
Costo de energía eléctrica para la distribución de agua en promedio para el 2023.	\$1,648.63	51.5%
Costo mantenimiento, pago para la persona encargada de operar las bombas.	\$1,551.37	48.5%

- No realizan proceso de clorado al agua antes de distribuirla a los puntos de entrega. Con base a la entrevista realizada, ANDA y la Universidad de El Salvador han hecho estudios de la calidad del agua del pozo y ambos han concluido que es potable.
- Se observó que los alrededores del tramo cercano a la línea de distribución de energía eléctrica para el sistema de bombeo están rodeados de cerros y laderas, lo cual, se tomará en cuenta para el dimensionamiento del sistema solar.
- La facturación es realizada por AES EEO.

4. Estudio de recurso solar

4.1. Disponibilidad de recurso solar

Tal como se describió en el apartado 2.3, los niveles de irradiancia en El Salvador son los suficientemente altos para poder instalar paneles solares y tener un aprovechamiento oportuno del recurso. En la figura 17 se muestra la ubicación de todos los puntos en análisis.

Mapa de Irradiación Global Horizontal

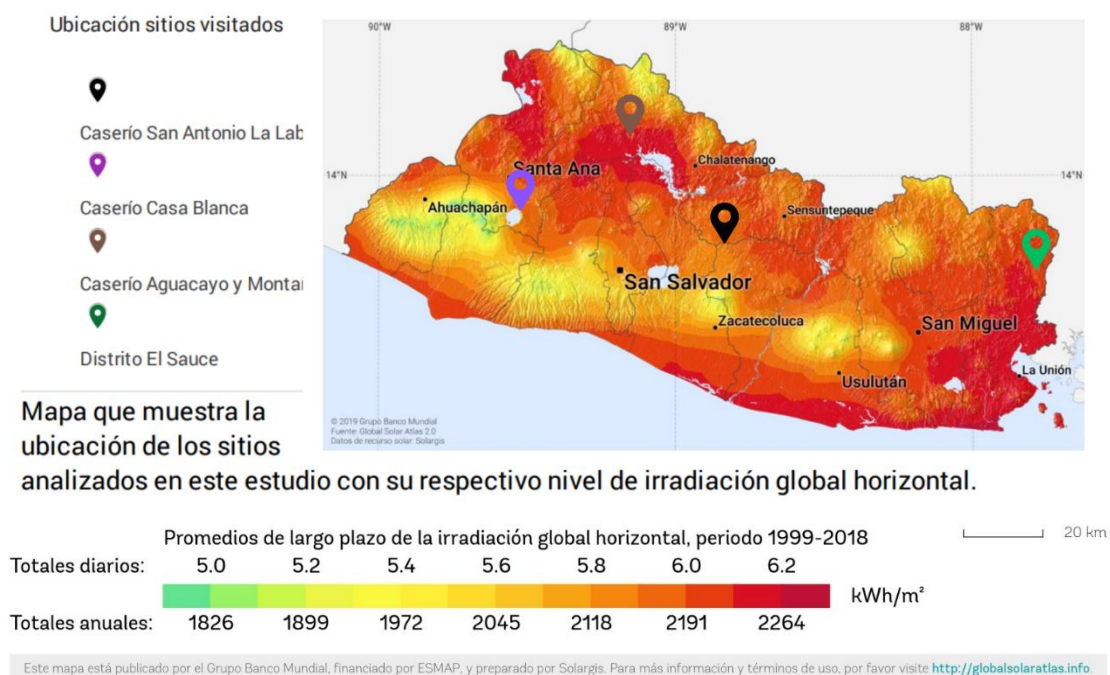


Figura 17. Mapa ubicación de los sitios de análisis en el mapa de distribución de irradiancia de El Salvador. Editado de: Solar resource map, 2021.

Se puede observar en la figura 17 que los niveles de irradiancia global horizontal (GHI por sus siglas en inglés) en los sitios de estudio rondan entre 5.8 a 6.2 kWh/m².

4.2. Datos meteorológicos

De forma específica, se han consultado diversas bases de dato para obtener datos meteorológicos a ser utilizados en cada sitio de análisis. Se seleccionó la base de datos METEONORM 8.1, la cual, dispone de datos mensuales de irradiancia para unas 2 500 estaciones terrestres como promedios de 1981-2000, 1991-2010 o 1996-2015, según el lugar, y datos satelitales de 1996-2015. Todas las estaciones con mediciones de irradiancia están disponibles directamente en la lista de sitios geográficos en la base de datos de PVsyst. Los datos de cualquier otro sitio se pueden obtener por interpolación entre las 3 estaciones más cercanas o con datos satelitales si ninguna estación está lo suficientemente cerca (PVSyst, n.d.).

En las tablas de la 11 a la 14 es posible observar los datos obtenidos meteorológicos obtenidos para cada sitio.

Tabla 11. Datos meteorológicos del Caserío La Labor. Fuente: Meteorom 8.1 y NASA.

Mes	GHI [W/m ²]	DHI [W/m ²]	HSP [kWh/m ²]	Factor K a 13°	HSP corregido	Temperatura [°C]
Enero	237.3	58.6	5.69	1.07	6.08	24.6
Febrero	249.5	76.1	6.19	1.05	6.47	25.6
Marzo	271.5	82.4	6.56	1.02	6.66	26.3
Abril	249.0	100.8	5.92	0.98	5.8	26.4
Mayo	237.5	117.7	5.59	0.95	5.28	26.0
Junio	245.5	115.6	5.57	0.94	5.21	25.0
Julio	272.5	91.1	6.24	0.95	5.9	25.8
Agosto	254.6	103.7	6.03	0.98	5.91	25.5
Septiembre	232.4	97.5	5.49	1.02	5.6	24.5
Octubre	200.3	90.9	5.28	1.06	5.6	24.7
Noviembre	211.7	83.0	5.49	1.09	5.96	24.2
Diciembre	218.8	58.6	5.48	1.09	5.94	24.7
Anual	240.0	89.7	5.79	1.02	5.87	25.3

Tabla 12. Datos meteorológicos del Caserío Casa Blanca. Fuente: Meteorom y NASA.

Mes	GHI [W/m ²]	DHI [W/m ²]	HSP [kWh/m ²]	Factor K a 13°	HSP corregido	Temperatura [°C]
Enero	251.9	50.7	5.69	1.07	5.81	24.3
Febrero	260.1	64.0	6.19	1.05	6.32	25.3
Marzo	282.3	82.7	6.56	1.02	6.69	26.1
Abril	275.8	90.7	5.92	0.98	6.14	26.2
Mayo	263.8	98.9	5.59	0.95	5.71	25.8
Junio	255.4	92.6	5.57	0.94	5.55	24.8
Julio	278.0	89.5	6.24	0.95	6.34	25.6
Agosto	263.3	103.2	6.03	0.98	6.06	25.3
Septiembre	249.4	88.5	5.49	1.02	5.55	24.3
Octubre	221.4	86.4	5.28	1.06	5.35	24.5
Noviembre	226.4	67.9	5.49	1.09	5.59	23.9
Diciembre	228.8	51.9	5.48	1.09	5.61	24.4
Anual	254.7	80.7	5.79	1.02	5.89	25.0

Tabla 13. Datos meteorológicos de los Caseríos Aguacayo y Montañita. Fuente: Meteorom y NASA.

Mes	GHI [W/m ²]	DHI [W/m ²]	HSP [kWh/m ²]	Factor K a 13°	HSP corregido	Temperatura [°C]
Enero	238.5	56.9	5.06	1.07	5.81	24.7
Febrero	253.2	74.0	5.69	1.05	6.32	25.7
Marzo	274.4	75.9	6.26	1.02	6.69	26.4
Abril	271.8	96.4	5.96	0.98	6.14	26.5
Mayo	259.1	102.9	5.58	0.95	5.71	26.1
Junio	250.0	101.0	5.4	0.94	5.55	25.1
Julio	273.3	90.0	6.01	0.95	6.34	25.9
Agosto	255.4	94.3	5.86	0.98	6.06	25.6
Septiembre	240.1	77.8	5.28	1.02	5.55	24.6
Octubre	210.0	86.0	5.04	1.06	5.35	24.8
Noviembre	214.0	80.8	4.88	1.09	5.59	24.3
Diciembre	219.4	57.2	4.88	1.09	5.61	24.8
Anual	246.6	82.8	5.49	1.02	5.89	25.4

Tabla 14. Datos meteorológicos de Distrito El Sauce. Fuente: Meteorom y NASA.

Mes	GHI [W/m ²]	DHI [W/m ²]	HSP [kWh/m ²]	Factor K a 13°	HSP corregido	Temperatura [°C]
Enero	226.7	62.5	5.66	1.07	5.81	30.0
Febrero	241.8	81.8	6.25	1.05	6.32	30.7
Marzo	266.3	88.1	6.71	1.02	6.69	31.3
Abril	259.0	107.1	6.03	0.98	6.14	31.3
Mayo	245.9	113.1	5.64	0.95	5.71	30.6
Junio	251.2	102.9	5.6	0.94	5.55	29.6
Julio	264.9	102.0	6.1	0.95	6.34	30.9
Agosto	256.2	108.9	5.96	0.98	6.06	30.6
Septiembre	241.1	104.2	5.69	1.02	5.55	28.7
Octubre	212.0	106.0	5.31	1.06	5.35	28.7
Noviembre	209.1	83.3	5.35	1.09	5.59	28.9
Diciembre	208.8	71.5	5.34	1.09	5.61	30.0
Anual	240.2	94.3	5.80	1.02	5.89	30.1

4.3. Metodología propuesta para estudio de localización de paneles solares

Una de las decisiones más importantes en un proyecto fotovoltaico es la localización de los paneles solares. Para maximizar el uso de la energía, es importante que la ubicación tenga las siguientes características:

- Posibilidad de orientación hacia el sur con el mínimo de obstáculos alrededor.
- Máxima irradiancia solar.
- Cercanía a la acometida eléctrica.

Para sustentar la decisión, se ha desarrollado un análisis utilizando Sistemas de Información Geográficos a través del software QGIS y el complemento GRASS.

La herramienta de procesamiento utilizada es *r.sun* como parte de la librería GRASS. La función exacta que se utilizará es *r.sun.insoltime*, la cual, crea un modelo de irradiancia solar; la salida de la simulación es un conjunto de

archivos ráster, obtenidos todos mediante sumas diarias de horas de sol, irradiancia global, irradiancia directa, irradiancia reflejada e irradiancia difusa (Zuluaga Baron, 2023).

El procesamiento se realiza para un solo día del año, ingresado como un número entre 1 y 365. Las entradas para este proceso son:

- Modelo de elevación digital (DEM): es un archivo tipo ráster que posee la información de relieve del área en estudio. En este trabajo, se ha utilizado un DEM con resolución de 30x30 metros haciendo uso de la información proporcionada por SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA.
- Mapa de pendientes del terreno: indica la inclinación del terreno respecto a un plano horizontal (ZoneGis, 2018).
- Mapa de aspecto: ángulo del azimut a la cual está orientada la pendiente. Es decir, la herramienta toma la topografía del terreno y clasifica, con ángulos, la orientación de las pendientes. La clasificación mostrada en la tabla 15 ayuda a interpretar los resultados obtenidos (RoCa SIG, 2021).

Tabla 15. Clasificación de direcciones obtenidas en un mapa de aspecto (RoCa SIG, 2021).

Dirección	Rango [°]	
Cenital	0.0	0.0
Norte	1.0	22.5
Noreste	22.5	67.5
Este	67.5	112.5
Sureste	112.5	157.5
Sur	157.5	202.5
Suroeste	202.5	247.5
Oeste	247.5	292.5
Noroeste	292.5	337.5
Norte	337.5	382.5

Valores individuales de inclinación y aspecto pueden ser introducidos, no obstante, se obtienen mejores resultados al utilizar los archivos ráster completos. Existen otros parámetros de entrada a considerar que no son de vital importancia su configuración tales como: longitudes, latitudes, coeficiente de radiación, coeficiente de Linke e información del horizonte. Los parámetros mencionados anteriormente, se dejan con valores por defecto como recomienda Zuluaga en su trabajo.

El coeficiente de albedo en el suelo fue configurado entre 35% a 40%. En la parte de parámetros avanzados, se considera un paso de 0.5 horas para el cálculo de radiación solar diaria.

Debido que la herramienta solo es capaz de procesar la distribución de irradiancia para un día específico, se han realizado los cálculos para el día más crítico desde el punto de vista de la energía solar, es decir, el solsticio de invierno, el 21 de diciembre, que en número correlativo del año es el 355.

La obtención de un mapa de distribución de irradiancia para cada sitio en análisis es una herramienta útil para tomar decisión de la ubicación óptima de los paneles solares.

4.3.1. Caso de estudio: Distrito El Sauce

Para ejemplificar el uso de la metodología descrita en el apartado 4.3. se ha seleccionado uno de los sitios visitados. En este caso, se utilizará de referencia los resultados obtenidos en el Distrito El Sauce.

A) Modelo Digital de Elevaciones del Distrito El Sauce

En la Figura 18 es posible ver la ubicación en El Salvador de la zona de estudio y, de forma ampliada, el Modelo de Elevación Digital del Distrito El Sauce y algunos puntos estratégicos que servirán de referencia.

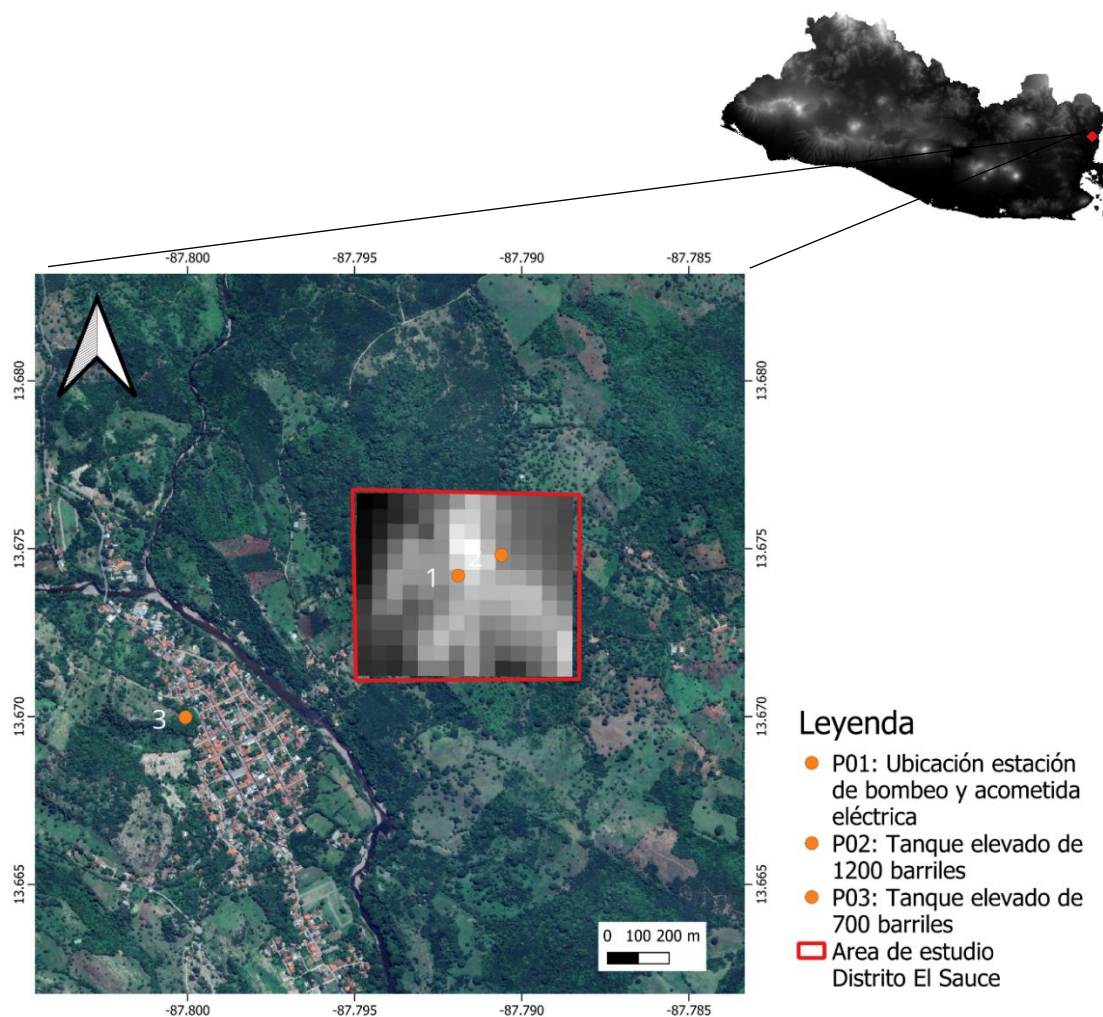


Figura 18. Modelo Digital de Elevaciones del área de estudio en Distrito El Sauce. Fuente: NASA-SSE.

B) Mapa de aspecto del Distrito El Sauce

Haciendo uso de la herramienta “Análisis de aspecto” en QGIS, es posible hacer la clasificación que se muestra en la Figura 19 en la cual, los pixeles de color azul intenso representan las zonas cuya pendiente está orientada hacia el sur.

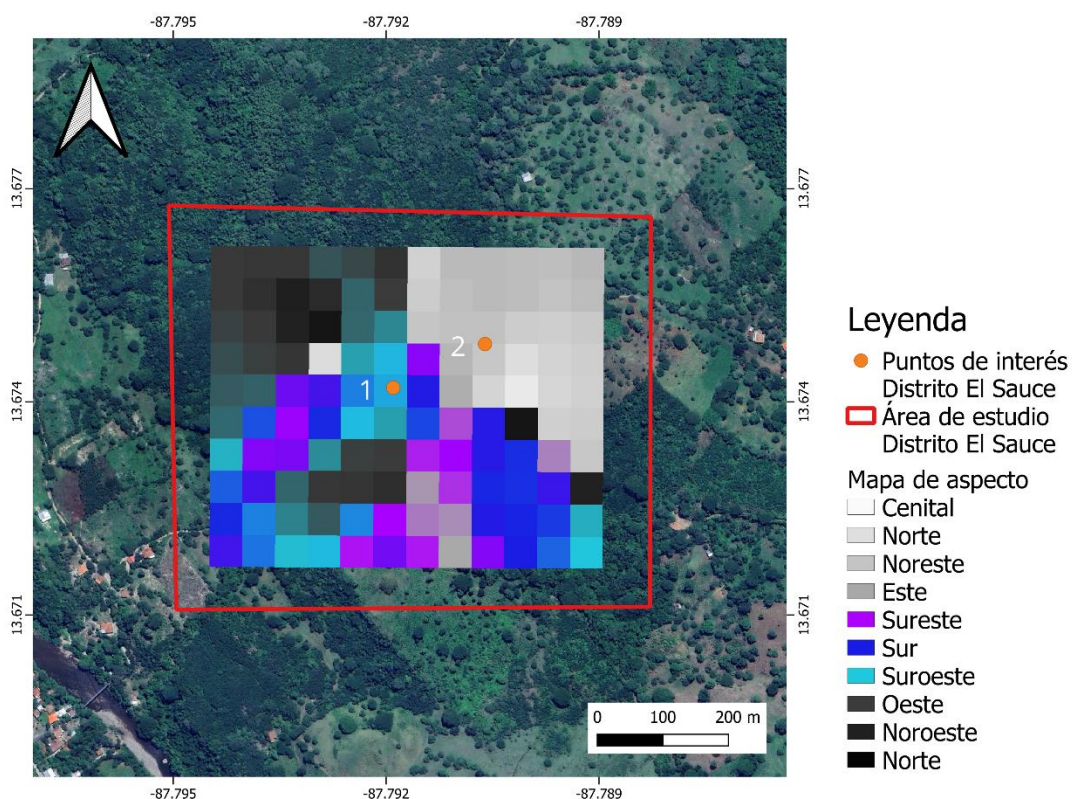


Figura 19. Mapa de aspecto del Distrito El Sauce. Elaboración propia haciendo uso de QGIS.

Con la información que revela el mapa de la Figura 19 se puede mencionar:

- La zona donde se encuentra la estación de bombeo y punto de conexión eléctrica se encuentra sobre una zona orientada hacia el sur/suroeste.

C) Mapa de distribución de irradiancia del Distrito El Sauce

Haciendo uso del complemento GRASS, el cual, es un analizador de datos ráster y vectorial, incluye un módulo que permite conocer la distribución de irradiancia en un área determinada.

En la Figura 20 se muestra la distribución de irradiancia en la zona de estudio. El código de color indica que entre más intenso es el color rojo, mayor irradiancia. De aquí, se puede observar que la distribución de irradiancia es constante en toda la zona de estudio.

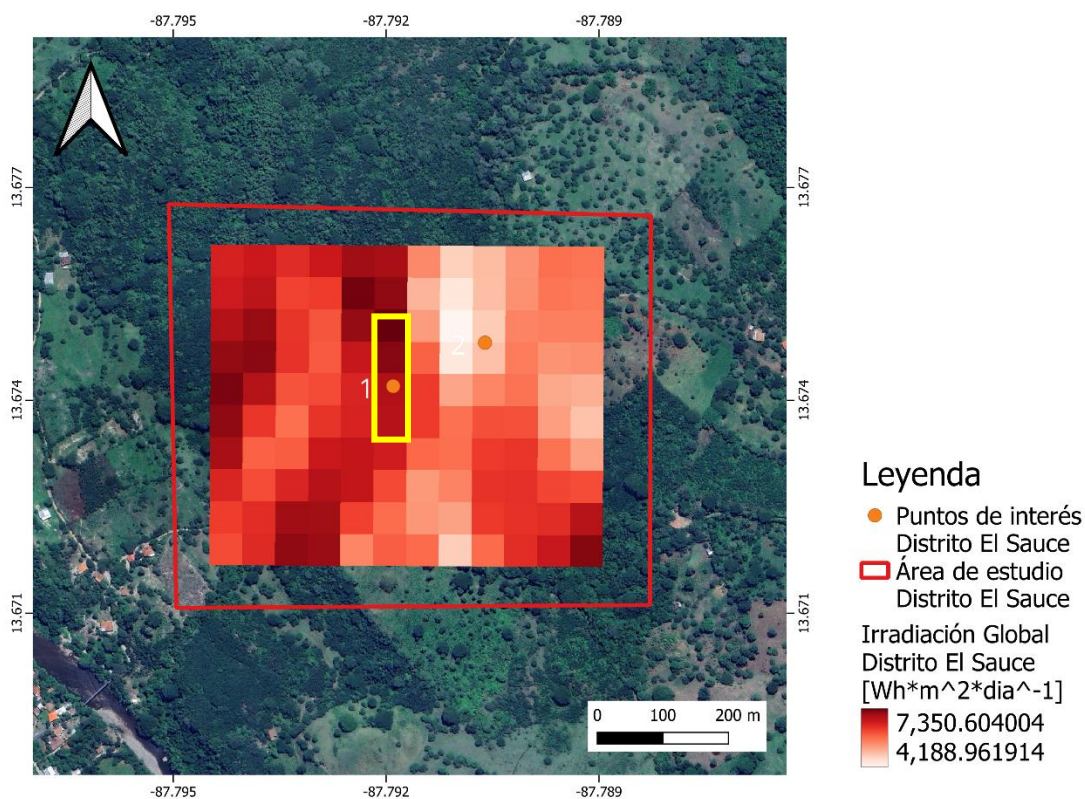


Figura 20. Mapa de distribución de irradiancia del Distrito El Sauce. Elaboración propia en QGIS y complemento GRASS.

Al comparar el mapa de la figura 19 con el mapa de la figura 20 se puede concluir que la zona más recomendable para la instalación de los paneles solares

es en los alrededores de la estación de bombeo (P01). Esta decisión está basada en:

- Orientación del terreno preferencialmente hacia el sur.
- Niveles de irradiancia altos, los valores máximos que se pueden encontrar en el área de estudio.
- Cercanía a la acometida eléctrica.

Las conclusiones obtenidas de la metodología coinciden con el reconocimiento de campo llevado a cabo en una visita técnica al sitio.

5. Planteamiento de solución por sitio

5.1. Sitio 1: Caserío San Antonio La Labor

Luego de haber expuesto la realidad en el Caserío San Antonio La Labor, se identifica que los principales problemas son:

- ✓ No existe una buena calidad en el servicio de distribución de agua. Actualmente se opera la bomba por un tiempo de 2.5 horas al día, lo cual permite llenar dos tanques que suman 23 m³. Esta estrategia solo es capaz de garantizar acceso ininterrumpido de agua al 65% de las familias del caserío; existe un 35% de familias que solo tienen acceso al agua 4 horas al día (entre 5:00 a 8:00).
- ✓ El costo por el servicio de agua que paga cada familia está compuesto principalmente por gastos fijos (mantenimiento, cloro, pago para la persona encargada de operar las bombas) y no por el cobro de energía eléctrica.

Ante esta realidad, se propondrá un sistema solar fotovoltaico como se muestra en la Figura 21 que, de forma independiente, reduzca el consumo energético de las bombas actuales a través de un sistema conectado a red y, en paralelo, un nuevo sistema de bombeo alimentado exclusivamente con energía solar fotovoltaica que permita llenar un nuevo tanque de captación de 10 m³.

El sistema propuesto pretende reducir los costos asociados al uso de energía eléctrica por bombeo electromecánico y mejorar la calidad del servicio a las familias que se ven más afectadas.

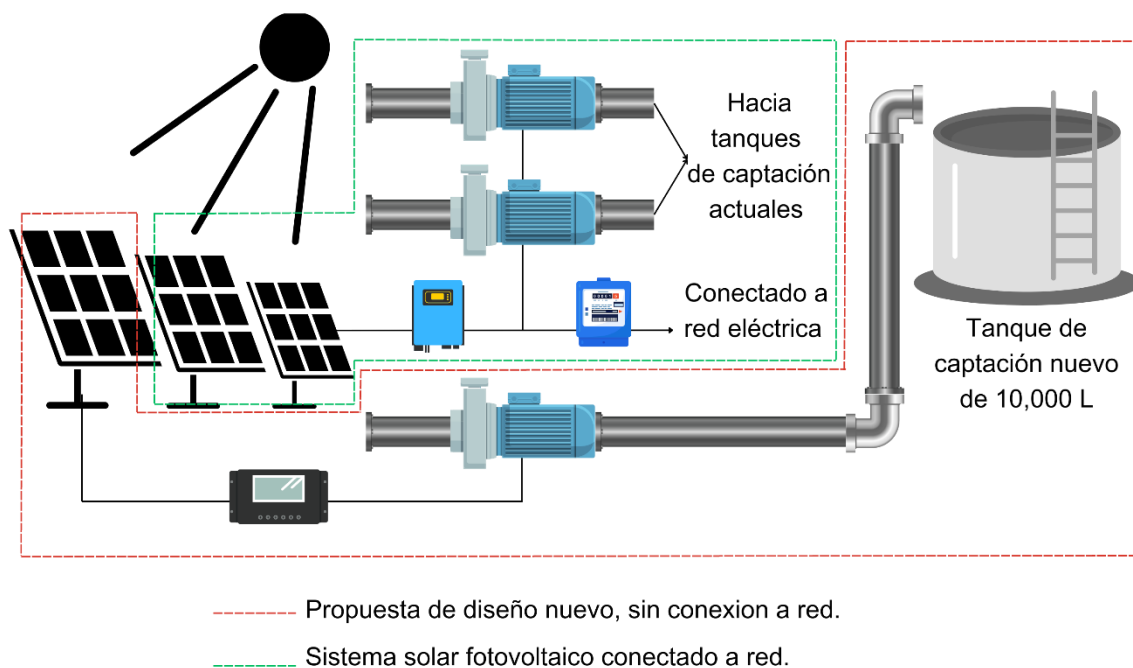


Figura 21. Propuesta de diseño tipo optimizada de sistema de bombeo fotovoltaico para Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.

5.1.1. Diseño de sistema fotovoltaico conectado a red

El primer paso para el cálculo será determinar cuál sería la máxima potencia y producción permitida, considerando que se trabajaría bajo la modalidad UPR.

Por lo tanto, se verificó, a nivel de facturación y consumo, cuál ha sido su capacidad nominal y su consumo de energía a lo largo de un año. Para ello se solicitó un histórico de consumo, potencia y facturación desde enero de 2022.

Tabla 16. Histórico de facturación eléctrica para estación de bombeo Caserío San Antonio La Labor. Fuente: AES

Mes	Energía [kWh]	Potencia [kW]	Importe
<i>jun-22</i>	293	5	\$ 44.58
<i>jul-22</i>	485	5	\$ 51.98
<i>ago-22</i>	95	5	\$ 23.61
<i>sep-22</i>	301	5	\$ 45.44
<i>oct-22</i>	289	5	\$ 39.60
<i>nov-22</i>	301	5	\$ 45.25
<i>dic-22</i>	291	5	\$ 42.41
<i>ene-23</i>	308	5	\$ 43.61
<i>feb-23</i>	309	5	\$ 45.98
<i>mar-23</i>	306	5	\$ 45.74
<i>abr-23</i>	301	5	\$ 36.74
<i>may-23</i>	292	5	\$ 44.96
Promedio	297.6		\$ 42.49

Los datos importantes por considerar son los siguientes:

$$\text{Consumo mensual promedio} = 297.6 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo acumulado 1 año (junio 22 a mayo 23)} = 3,571 \text{ kWh}$$

Con esta información procedemos a calcular la potencia máxima permitida para el sistema, para ello ocupamos los siguientes datos:

$$Yf = 1,697 \text{ kWh anual} / \text{kWp}$$

La producción anual máxima es 3571 kWh. No obstante, para cumplir el Art. 8 de la normativa UPR, se limitará a que los paneles fotovoltaicos suplan aproximadamente el 80% de la demanda, es decir, 2,856.8 kWh/año.

$$\text{Potencia Máxima} = \frac{\text{Energía Máxima Generada}}{Yf \text{ anual}}$$

$$\text{Potencia Máxima} = \frac{2856.8 \text{ kWh/año}}{1,697 \text{ kWh/año/kWp}}$$

$$\text{Potencia Máxima} = 1.68 \text{ kWp}$$

Para el dimensionamiento del sistema se ha utilizado el software PVSyst 7.4. Se han seleccionado módulos fotovoltaicos Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV de 400 Wp e inversores Growatt MIC 1500TL-X de 1.5kW de potencia de salida. Además, se ha considerado paneles solares fijos con un ángulo de inclinación de 13° y azimut de 45° S-O. Debido a la gran cantidad de montañas y laderas que existen en los alrededores del sitio propuesto para la instalación, se han considerado el sombreado de horizonte. En la tabla 7 se detalla el resumen del sistema.

Tabla 17. Resumen del sistema solar fotovoltaico conectado a red para Caserío San Antonio la Labor. Elaboración propia a través de PVSyst 7.4.

Módulo fotovoltaico	Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV
Cantidad de módulos por string	4
Inversor	Growatt MIC 1500TL-X
Cantidad de inversores	1
Cantidad de strings/inversor	1
Potencia fotovoltaica	1.6 kWp
Potencia en AC	1.5 kW
Área estimada para el sistema	8 m ²

5.1.2. Diseño sistema de bombeo nuevo alimentado con energía solar fotovoltaica.

En la figura 22 se muestra el esquema simplificado del nuevo sistema de bombeo alimentado por energía solar fotovoltaica que permitirá aumentar el tiempo de acceso al agua potable para las familias que actualmente sufren de un servicio deficiente. Se realizará un diseño para un tiempo de vida de 20 años.

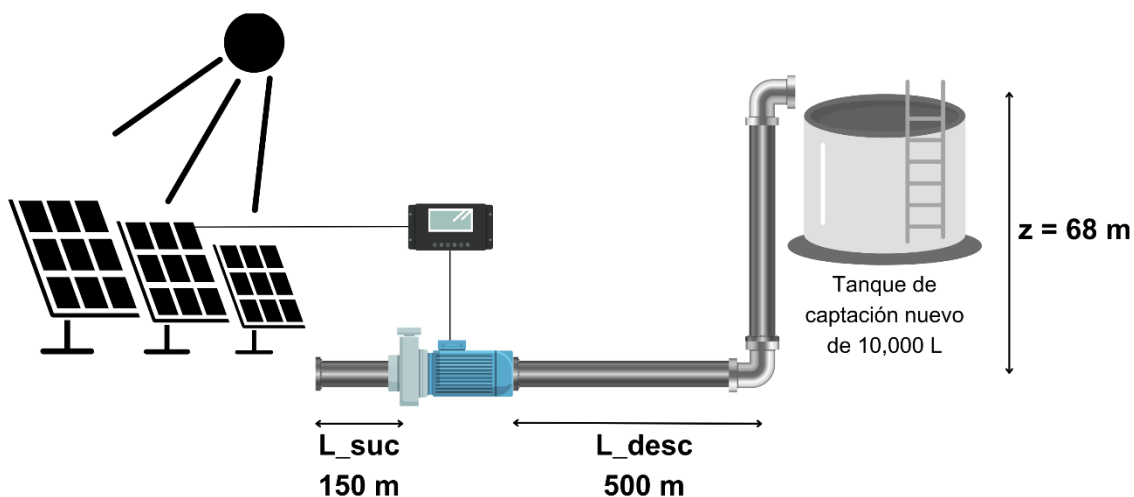


Figura 22. Propuesta de sistema hidráulico nuevo para Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.

A) Demanda de agua

Actualmente, son 13 familias, que debido a la geografía del terreno donde viven, solo tienen acceso al agua por 2.5 horas. Considerando la tasa de crecimiento geométrico calculado en el apartado 4.1.1. es posible calcular que la población esperada para dentro de 20 años son 16 familias. En promedio, habitan 5 personas por familia en esta comunidad, por tanto, se realizará un diseño para 80 personas. Considerando una demanda de agua de 80 L/habitante/día, se determina el volumen de almacenamiento de agua diario:

$$\text{Volúmen almacenamiento} = 80 \frac{\text{L}}{\text{hab}} * 80 \text{ hab} = 6400 \frac{\text{L}}{\text{día}} = 6.4 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Para garantizar un servicio adecuado, se decide realizar el diseño para un tanque de almacenamiento de 10,000.0 L/día.

B) Estimación del caudal de bombeo

Una vez calculado el volumen de almacenamiento necesario, se calcula el caudal de bombeo que manejará el nuevo sistema de bombeo:

$$Q = \frac{V}{HSP}$$

Donde:

Q: Caudal de bombeo.

V: Volumen de acumulación

HSP: Horas Sol Pico del sitio de instalación de los Paneles Solares.

Del apartado 4.1.3.2. se sabe que las Horas Sol Pico mínimas para este sitio son 5.21; el volumen de acumulación proyectado es 10,000.0 L; por tanto, el caudal del sistema de bombeo solar debe ser como mínimo 32 L/min.

C) Estimación de la altura dinámica de la bomba a instalar (H_B)

Para la estimación de la altura dinámica de la bomba, se utilizarán los mismos valores de caudal y diámetro de tubería que poseen las bombas que operan actualmente en la comunidad, es decir, $Q = 32 \text{ L/min} = 0.000533 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$; $D = 2 \text{ pulg.} = 0.0508 \text{ m}$.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre la superficie libre del manantial de donde se obtiene el agua y la superficie libre del tanque de almacenamiento, se tiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + H_f + H_s$$

Donde:

P_1 : Presión de la superficie libre del manantial (se considera cero).

γ : Peso específico del agua a temperatura de 25°C.

V_1 : Velocidad del agua en el manantial (se considera cero por ser un depósito de agua muy grande)

Z_1 : Altura de la superficie libre del manantial (se considera está al nivel de referencia, por tanto, $Z_1=0$)

H_B : Altura dinámica de la bomba.

P_2 : Presión de la superficie libre del tanque de almacenamiento (se considera cero).

V_2 : Velocidad del agua en el tanque de almacenamiento (se considera cero por ser un depósito de agua muy grande)

Z_2 : Altura de la superficie libre del tanque de almacenamiento.

H_f : pérdidas primarias debido a la fricción entre el fluido y las paredes de la tubería.

H_s : pérdidas secundarias debido a los accesorios a instalar en la tubería.

Al simplificar los términos, la ecuación de Bernoulli se resume a:

$$H_B = Z + H_f + H_s$$

En la tabla 18 se resumen los parámetros calculados para encontrar la altura dinámica de la bomba.

Tabla 18. Resumen de parámetros utilizados para cálculo de altura dinámica de la bomba para el sistema hidráulico propuesto para el Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.

Propiedades físicas del agua		
$T = 25^\circ C; \rho = 997.1 \frac{kg}{m^3}; \mu = 0.894 \times 10^{-3} \frac{N \cdot s}{m^2}; \gamma = 9778 N/m^3$		
Descripción	Ecuación	Resultado
Numero de Reynolds	$Re = \frac{4Q\rho}{\pi\mu D}$	1.48996×10^4
Rugosidad relativa (tubería de acero galvanizado)	$e = \frac{\varepsilon}{D}$	0.0029528
Factor de fricción de Darcy (f)	Diagrama de Moody	0.03276

Pérdidas de energía primaria (H_f)	$H_f = f * \frac{L}{D} * \frac{1}{2g} * \left(\frac{4Q}{\pi D^2}\right)^2$	1.48 m
Pérdidas de energía secundaria (H_s) (Se consideran 2 codos roscados a 90°)	$H_s = k \left(\frac{1}{2g}\right) \left(\frac{4Q}{\pi D^2}\right)^2$	0.14 m
Altura dinámica de la bomba (H_B) ²	$H_B = FC(Z + H_f + H_s)$	104.43 m

Al realizar una investigación de posibles proveedores de una bomba solar de superficie que entregue al menos 32 L/min y una altura dinámica de 104.43 m, se determinó que es una combinación que se encuentra fuera de los rangos de diseño de los fabricantes. Por tanto, se procede a realizar un análisis de diámetro óptimo y un ajuste del caudal.

El diámetro óptimo de tubería se obtiene cuando las pérdidas de energía son mínimas. En la figura 23 se determina que a partir de 4 pulgadas de diámetro la altura dinámica se estabiliza.

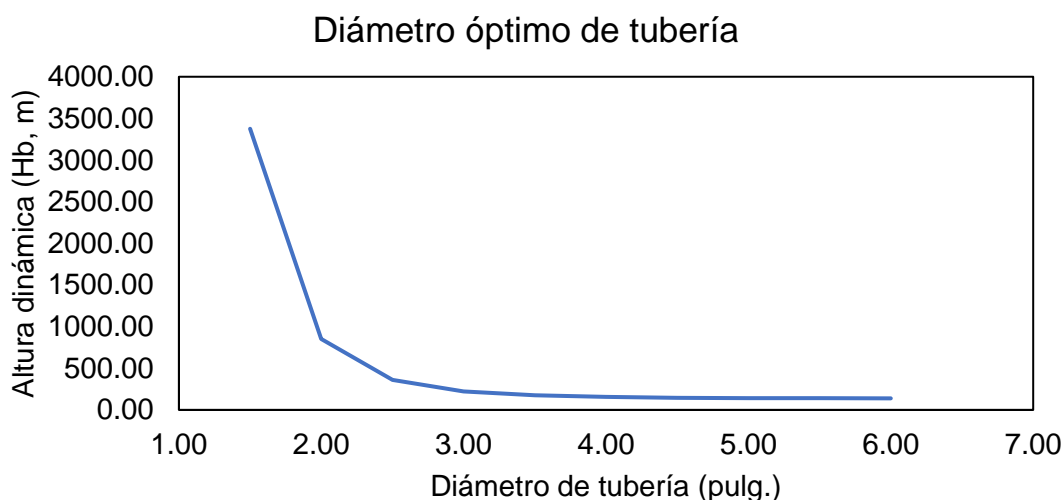


Figura 23. Diámetro óptimo de tubería para sistema solar del Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.

² FC: Factor de corrección para garantizar que el flujo llegue al tanque de captación aun cuando los niveles de irradiancia sean bajos. Se ha considerado un FC de 1.5

Recalculando la altura dinámica considerando: $Q = 550 \frac{L}{min}$; $D = 4 \text{ pulg}$, se obtiene 155.68 m.

Con base a la información de altura dinámica (155.68 m) y el caudal de diseño (550 L/min) se ha considerado colocar dos bombas en serie de 80 m de altura dinámica y 550 L/min seleccionando la bomba centrífuga Lorentz CS-F20-7³ con un controlador PSk2-9 con los siguientes datos técnicos: potencia 10 kW; voltaje de entrada 850 V; V_{mp} óptimo > 575 V; Corriente de salida 17 A.

D) Módulos fotovoltaicos para alimentar la bomba

Con los datos técnicos del controlador PSk2-9 se establecerán la cantidad de módulos fotovoltaicos a instalar. Se utilizarán los mismos paneles (Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV de 400 Wp.) que se proponen para suplir la demanda de energía que actualmente consume el sistema de bombeo.

$$\# \frac{MFV_{min}}{string} = \frac{V_{mp \text{ max del controlador}}}{V_{mp \text{ max del MFV}}} = \frac{575}{40.01} > 14.37$$

$$\# \frac{MFV_{min}}{string} = \frac{V_{max \text{ del controlador}}}{V_{oc \text{ del MFV}}} = \frac{850}{48.35} > 17.58$$

Por tanto, se decide colocar 14 módulos fotovoltaicos en serie conectados directamente al controlador. No obstante, se ha decidido colocar dos bombas en serie, por tanto, se necesitará el doble de paneles y dos controladores para poder satisfacer el diseño. Con este arreglo, se garantiza una potencia de 5.5 kW en AC, lo que corresponde a una altura dinámica de 80m a 183.3 L/min por bomba, lo cual satisface las condiciones de diseño.

³ Ver ficha técnica: <https://www.tmsmx.com/wp-content/uploads/2019/08/Ficha-t%C3%A9cnica-Lorentz-PSk2-9-CS-F20-7.pdf?srsId=AfmBOooYf7e1umQYsf8xjaCvtuQ8il4njNOfT0VuL0VZxBDvlurI9ULU>

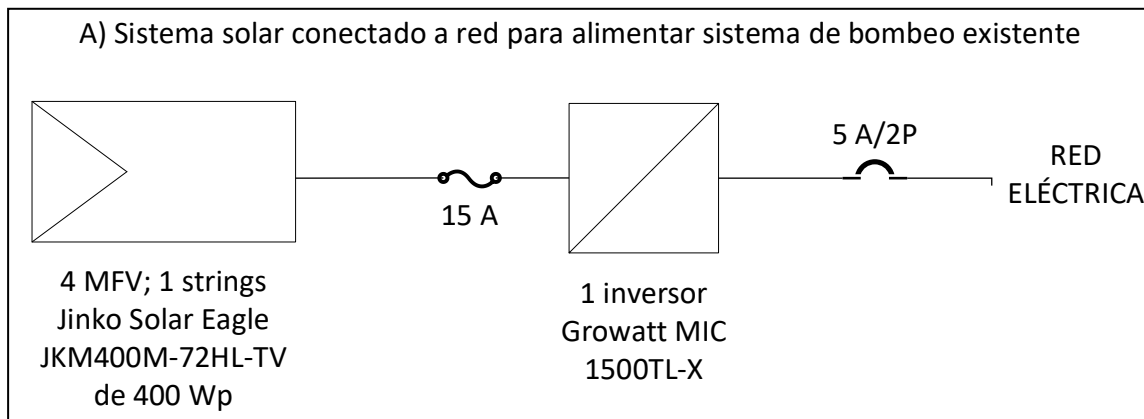
E) Resumen del sistema

A continuación, se resume el sistema propuesto para mejorar la calidad del servicio para las familias actuales y con una proyección de hasta 20 años.

Bomba centrífuga de superficie	Lorentz CS-F20-7
Diámetro de tubería de succión y descarga	4 pulgadas
Módulo fotovoltaico	Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV
Cantidad de módulos por string	14
Controlador	PSk2-9
Cantidad de controladores	2
Cantidad de strings/controlador	1
Potencia fotovoltaica	5.6 kWp
Potencia en AC	5.5 kW

5.1.3. Diagrama unifilar

En la figura 24 se muestra el diagrama unifilar de los sistemas propuestos. Se pretende que este diseño reduzca un 77% la facturación de energía eléctrica que actualmente tiene la estación de bombeo y se mejore la calidad del servicio de agua potable a través del acceso 24/7 de agua potable al 100% de los habitantes del Caserío San Antonio La Labor.



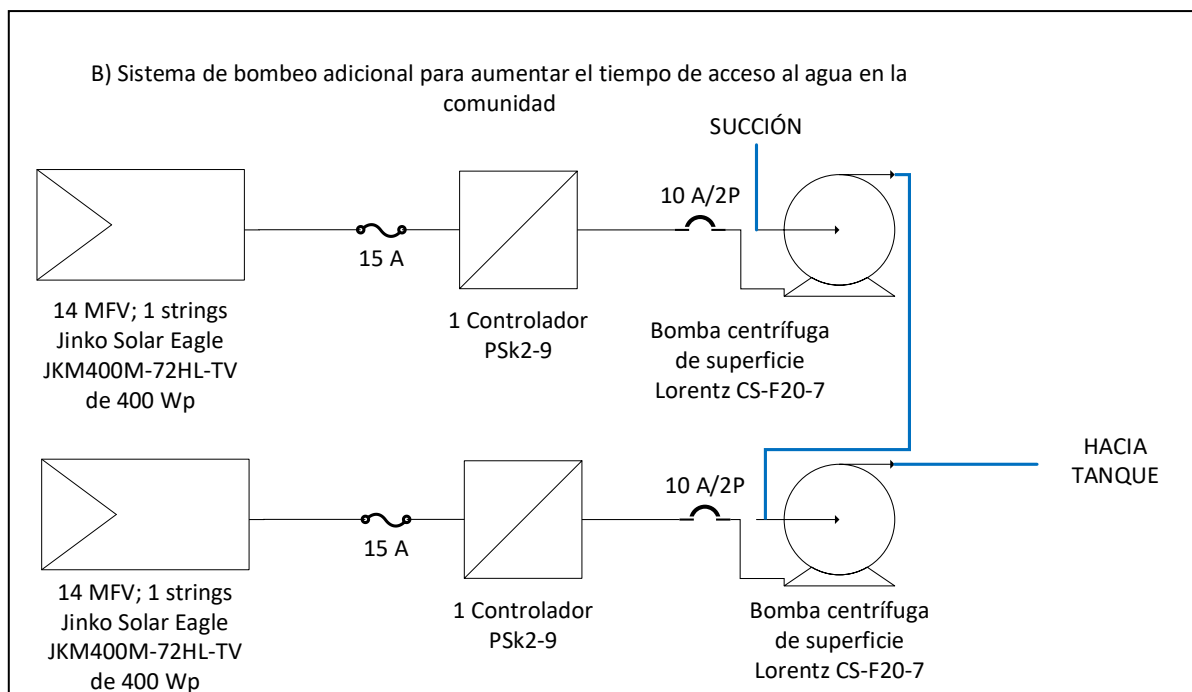


Figura 24. Diagrama unifilar del sistema propuesto para el Caserío San Antonio La Labor. Elaboración propia.

5.2. Sitio 2: Caserío Casa Blanca

Luego de haber expuesto la realidad en el Caserío Casa Blanca, se identifica que los principales problemas son:

- ✓ No existe una buena calidad en el servicio de distribución de agua. Actualmente se bombean 3.5 horas al día lo cual permite llenar un tanque de 27.8 m³. Esta estrategia no es capaz de mantener un suministro constante de agua a todos los usuarios.
- ✓ El costo por el servicio de agua que paga cada familia está compuesto, principalmente, para cubrir el costo de energía eléctrica de la bomba.

Ante esta realidad, y debido a la sencillez del sistema, se propone reemplazar la bomba sumergible actual por una alimentada 100% con energía solar fotovoltaica independiente de la red eléctrica, realizar un adecuado

dimensionamiento hidráulico (diámetro óptimo de tubería y potencia de la bomba) y construir un nuevo tanque elevado que permita almacenar energía hidráulica.

5.2.1. Dimensionamiento sistema solar fotovoltaico

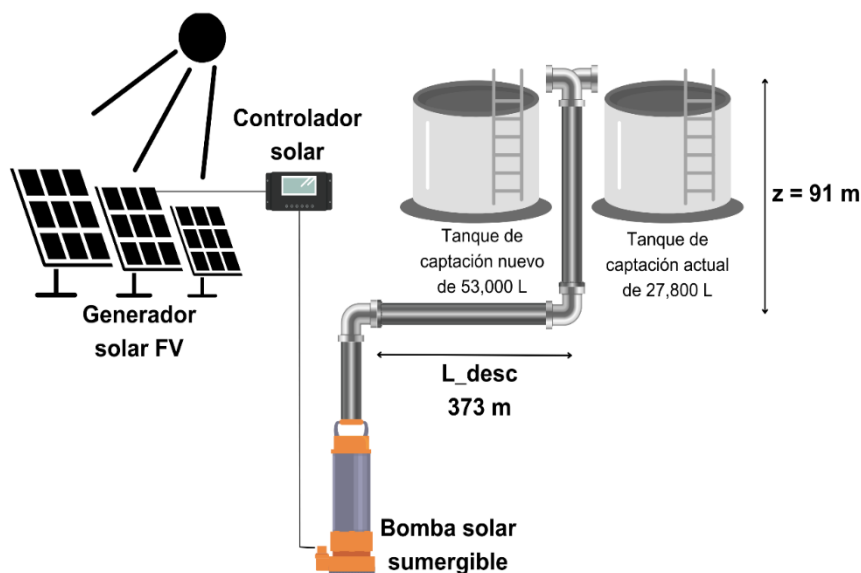


Figura 25. Propuesta de sistema hidráulico nuevo para Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.

En la figura 25 se muestra el esquema simplificado del nuevo sistema de bombeo alimentado por energía solar fotovoltaica que permitirá aumentar el tiempo de acceso al agua potable para las familias que actualmente sufren de un servicio deficiente, además de eliminar el costo de energía que implica el sistema de bombeo actual. Se realizará un diseño para un tiempo de vida de 20 años.

A) Demanda de agua

Actualmente son 90 familias que poseen un servicio deficiente de acceso al agua de uso diario y se ven impactados económicamente por el alto costo de energía eléctrica por el bombeo de agua. Considerando la tasa de crecimiento geométrico calculado en el apartado 4.2.1. es posible calcular que la población esperada para dentro de 20 años son 984 habitantes. Considerando una

demanda de agua de 80 L/habitante/día, se determina el volumen de almacenamiento de agua diario:

$$\text{Volúmen almacenamiento} = 80 \frac{\text{L}}{\text{hab}} * 984 \text{ hab} = 78,720 \frac{\text{L}}{\text{día}} = 78.72 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Para garantizar un servicio adecuado, se decide realizar el diseño para un tanque de almacenamiento de 80 000 L/día.

El tanque de almacenamiento actual posee una capacidad de 27 800 L, por tanto, se recomienda construir un tanque nuevo de 53 000 L a la misma elevación que el tanque de almacenamiento existente.

B) Estimación del caudal de bombeo

Una vez calculado el volumen de almacenamiento necesario, se calcula el caudal de bombeo que manejará el nuevo sistema de bombeo:

$$Q = \frac{V}{HSP}$$

Donde:

Q: Caudal de bombeo.

V: Volumen de acumulación

HSP: Horas Sol Pico del sitio de instalación de los Paneles Solares.

Del apartado 4.2.3.2. se sabe que las Horas Sol Pico mínimas para este sitio son 5.35; el volumen de acumulación proyectado es 80 000 L; por tanto, el caudal del sistema de bombeo solar debe ser 250 L/min.

C) Estimación de la altura dinámica de la bomba a instalar (H_B)

Para la estimación de la altura dinámica de la bomba, se utilizarán los siguientes valores: $Q = 250 \frac{\text{L}}{\text{min}} = 0.004167 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre la superficie libre del lago de donde se obtiene el agua y la superficie libre del tanque de almacenamiento, se tiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + H_f + H_s$$

Donde:

P_1 : Presión de la superficie libre del manantial (se considera cero).

γ : Peso específico del agua a temperatura de 25°C.

V_1 : Velocidad del agua en el manantial (se considera cero por ser un depósito de agua muy grande)

Z_1 : Altura de la superficie libre del manantial (se considera está al nivel de referencia, por tanto, $Z_1=0$)

H_B : Altura dinámica de la bomba.

P_2 : Presión de la superficie libre del tanque de almacenamiento (se considera cero).

V_2 : Velocidad del agua en el tanque de almacenamiento (se considera cero por ser un depósito de agua muy grande)

Z_2 : Altura de la superficie libre del tanque de almacenamiento.

H_f : pérdidas primarias debido a la fricción entre el fluido y las paredes de la tubería.

H_s : pérdidas secundarias debido a los accesorios a instalar en la tubería.

Al simplificar los términos, la ecuación de Bernoulli se resume a:

$$H_B = Z + H_f + H_s$$

En la tabla 19 se resumen los parámetros calculados para encontrar la altura dinámica óptima de la bomba.

Tabla 19. Resumen de parámetros utilizados para cálculo de altura dinámica de la bomba para el sistema hidráulico propuesto para el Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.

Propiedades físicas del agua		
$T = 25^{\circ}C; \rho = 997.1 \frac{kg}{m^3}; \mu = 0.894 \times 10^{-3} \frac{N \cdot s}{m^2}; \gamma = 9778 N/m^3$		
Descripción	Ecuación	Resultado
Numero de Reynolds	$Re = \frac{4Q\rho}{\pi\mu D}$	7.74×10^4
Rugosidad relativa (tubería de acero galvanizado)	$e = \frac{\varepsilon}{D}$	0.00197
Factor de fricción de Darcy (f)	Diagrama de Moody	0.02529
Pérdidas de energía primaria (H_f)	$H_f = f * \frac{L}{D} * \frac{1}{2g} * \left(\frac{4Q}{\pi D^2}\right)^2$	5.24 m
Pérdidas de energía secundaria (H_s) (Se consideran 3 codos roscados a 90°)	$H_s = k \left(\frac{1}{2g}\right) \left(\frac{4Q}{\pi D^2}\right)^2$	0.13 m
Altura dinámica de la bomba (H_B)	$H_B = FC(Z + H_f + H_s)$	144.54 m
Diámetro óptimo	Ver figura 24	3 pulg.

El diámetro óptimo de tubería se obtiene cuando las pérdidas de energía son mínimas. En la figura 26 se determina que a partir de 3 pulgadas de diámetro la altura dinámica se estabiliza.

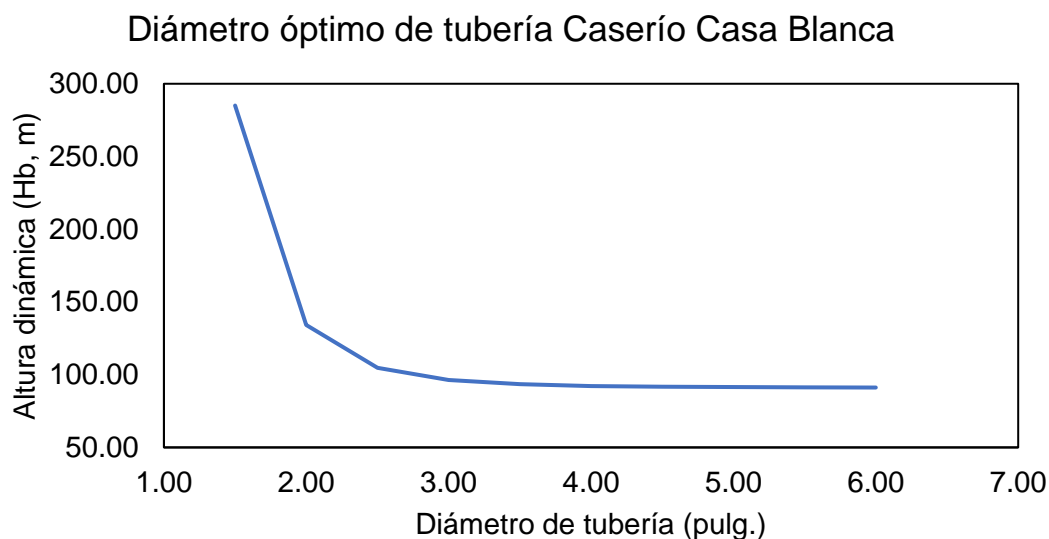


Figura 26. Cálculo del diámetro óptimo para sistema de bombeo en Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.

Con base a la información de altura dinámica (144.54 m) y el caudal de diseño (250 L/min) se decide colocar 2 bombas ⁴ (7.5HP, 3P, 380V ,60Hz, 60GMP) en serie de 75m de altura dinámica con un caudal de 252 l/min y un contralor por cada bomba modelo FD Solar 5.5KW N4⁵.

⁴ Información técnica de la bomba sumergible: <https://franklinagua.com/media/11228/Hojas-de-Catalogo-Serie-Radial-6in.pdf> P.2

⁵ Información técnica del controlador: <https://franklinwater.eu/media/427842/308-018-693-en-fhoton-solarpak-web.pdf> P. 28

D) Módulos fotovoltaicos para alimentar la bomba

Utilizando la información de la figura 27 proporcionada por el fabricante Franklin Electric, es posible determinar la potencia fotovoltaica necesaria para alimentar cada bomba de 7.5 HP seleccionada.

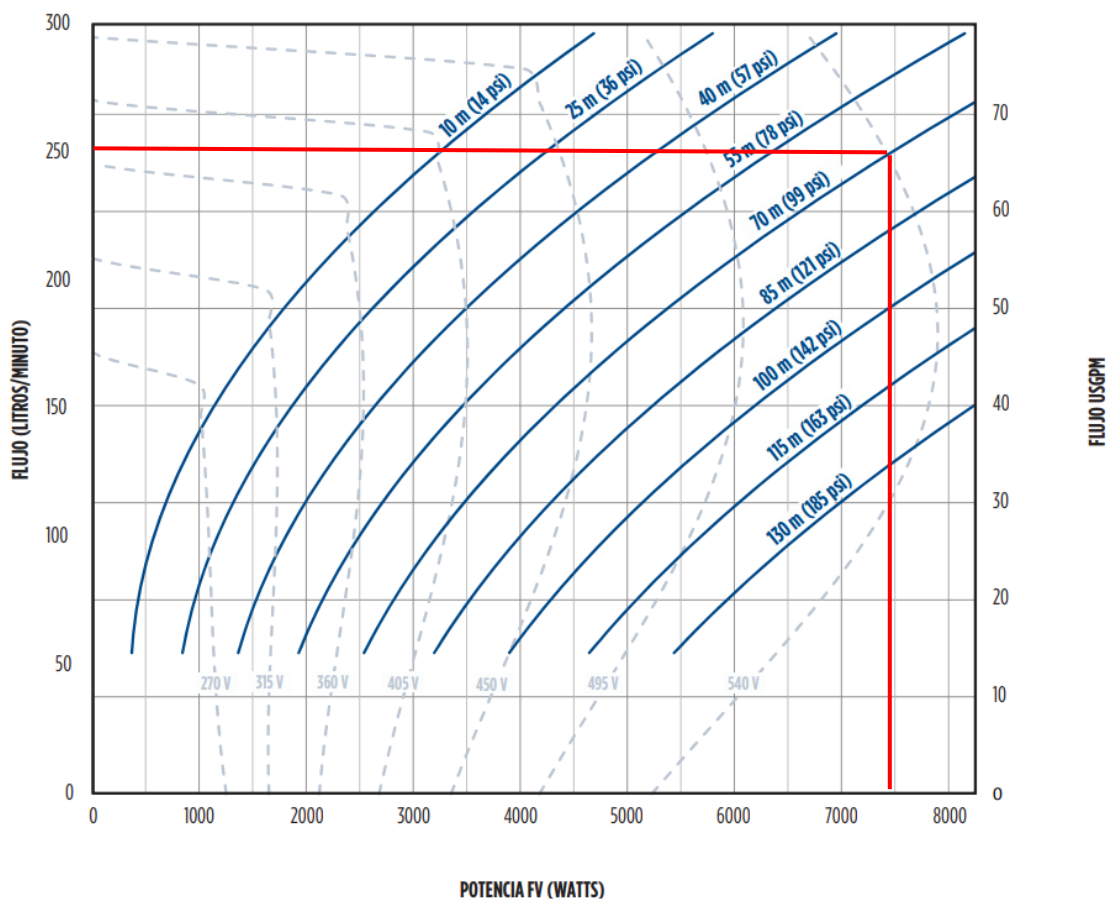


Figura 27. Curva de operación del Photon 3 Solarpak 7.5HP. Fuente: Franklin Electric.

De la figura 27 se determina que la potencia fotovoltaica mínima necesaria es de 7,500.0 Wp para alimentar el sistema propuesto. Si se utilizan módulos

fotovoltaicos Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV, serán necesarios 28 módulos repartidos en 2 strings de 14 paneles cada uno⁶ produciendo 8,960Wp.

E) Resumen del sistema

A continuación, se resume el sistema propuesto para mejorar la calidad del servicio para las familias actuales y con una proyección de hasta 20 años.

Bomba centrífuga sumergible	Franklin Electric 100FA7S6-PE
Diámetro de tubería de descarga	3 pulgadas
Módulo fotovoltaico	Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV
Cantidad de módulos por string	14
Controlador	FHOTON 3
Cantidad de controladores	2
Cantidad de strings/controlador	2
Potencia fotovoltaica	8.960 kWp
Total de módulos fotovoltaicos	56

5.2.2. Diagrama unifilar

En la figura 28 se muestra el diagrama unifilar del sistema propuesto para cada bomba. Se pretende que este diseño elimine la facturación de energía eléctrica que actualmente tiene la estación de bombeo y se mejore la calidad del servicio de a través del acceso 24/7 de agua al 100% de los habitantes del Caserío Casa Blanca.

⁶ Arreglo fotovoltaico corroborado con calculadora en línea de Franklin Electric <https://franklin.config.intelliquip.com/>

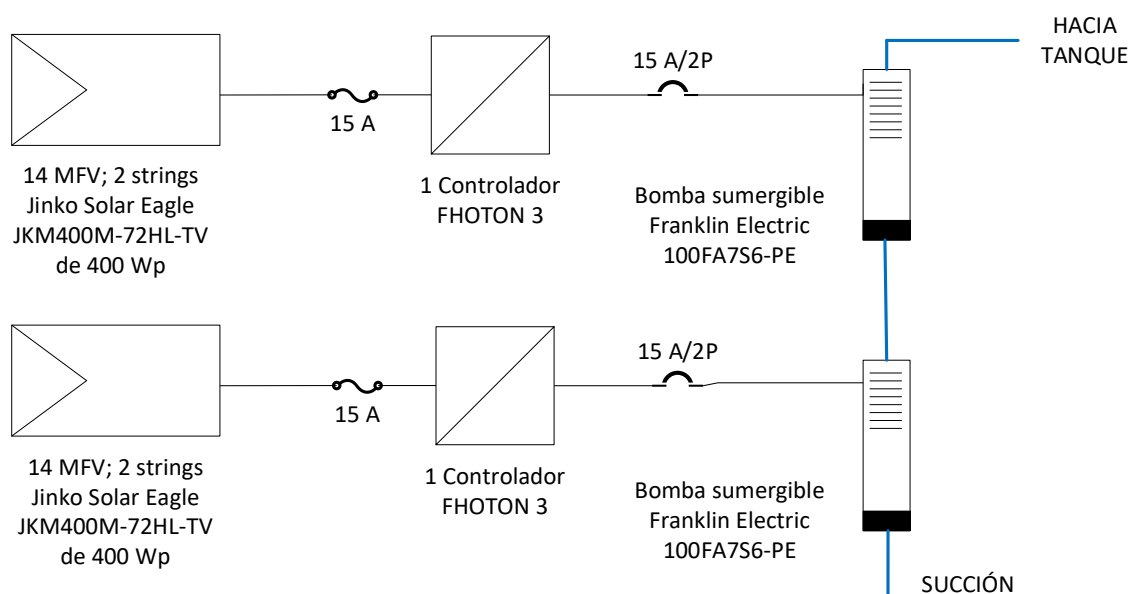


Figura 28. Diagrama unifilar del sistema propuesto para cada bomba del Caserío Casa Blanca. Elaboración propia.

5.3. Sitio 3: Caserío Aguacayo y Montañita

Luego de haber expuesto la realidad del sistema de distribución de agua del Caserío Aguacayo y Montañita en el apartado 3.3, se puede afirmar que el principal punto de mejora está en proponer un sistema que reduzca el consumo de energía eléctrica para producir un impacto directo en la facturación de este sistema.

Por tanto, se propondrá un sistema conectado a red que permita reducir la facturación asociada al consumo energético de la bomba sumergible que existe en la caseta de bombeo.

5.3.1. Diseño del sistema fotovoltaico conectado a red.

El primer paso para el cálculo será determinar cuál sería la máxima potencia y producción permitida, considerando que se trabajaría bajo la modalidad UPR.

Por lo tanto, se ha verificado, a nivel de facturación y consumo, cuál ha sido su capacidad nominal y su consumo de energía a lo largo de un año. Para ello la comunidad proporcionó la facturación anual existente desde 2 de octubre de 2023 hasta el 4 de marzo de 2024. El detalle se puede ver en la tabla 20.

Tabla 20. Histórico de facturación eléctrica para estación de bombeo Caserío Aguacayo y Montañita. Fuente: Directivos de la Junta de Agua del caserío Aguacayo y Montañita.

Mes	Energía ⁷ [KWh]	Potencia [KW]
<i>Abril</i>	1,483.0	12
<i>Mayo</i>	1,483.0	12
<i>Junio</i>	1,483.0	12
<i>Julio</i>	1,483.0	12
<i>Agosto</i>	1,483.0	12
<i>Septiembre</i>	1,483.0	12
<i>Octubre</i>	1,133.0	12
<i>Noviembre</i>	1,165.0	12
<i>Diciembre</i>	1,605.5	12
<i>Enero</i>	1,594.3	12
<i>Febrero</i>	1,697.3	12
<i>Marzo</i>	1,705.0	12
Promedio	1,483.0	12

Los datos importantes por considerar son los siguientes:

$$\text{Consumo mensual promedio} = 1483.0 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo acumulado 1 año} = 17798.1 \text{ kWh}$$

Con esta información procedemos a calcular la potencia máxima permitida para el sistema, para ello ocupamos los siguientes datos:

$$Yf = 1,793 \text{ kWh anual} / \text{kW}_p$$

⁷ Los meses de abril a septiembre han sido extrapolados conforme el promedio mensual reportado en la factura de energía proporcionada por la ADESCO.

La producción anual máxima es 17798.1 kWh. No obstante, para cumplir el Art. 8 de la normativa UPR, se limitará a que los paneles fotovoltaicos suplan el 80% de la demanda, es decir, 14238.48 kWh/año.

$$Potencia\ Máxima = \frac{Energía\ Máxima\ Generada}{Yf\ anual}$$

$$Potencia\ Máxima = \frac{14238.48\ kWh/año}{1,793\ kWh/año/kWp}$$

$$Potencia\ Máxima = 7.9\ kWp$$

Para el dimensionamiento del sistema se ha utilizado el software PVSyst 7.4. Se han seleccionado módulos fotovoltaicos Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV de 400 Wp e inversores Huawei SUN2000-5KTL-L1 de 5kW de potencia de salida. Además, se ha considerado paneles solares fijos con un ángulo de inclinación de 13° y azimut de 0° (hacia el sur⁸). Debido a la gran cantidad de montañas y laderas que existen en los alrededores del sitio propuesto para la instalación, se han considerado el sombreado de horizonte. En la tabla 21 se detalla el resumen del sistema.

Tabla 21. Resumen del sistema solar fotovoltaico conectado a red para Caserío Aguacayo y Montañita. Elaboración propia a través de PVSyst 7.4.

Módulo fotovoltaico	Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV
Cantidad de módulos por string	8
Inversor	Huawei SUN2000-5KTL-L1
Cantidad de inversores	1
Cantidad de strings/inversor	2
Potencia fotovoltaica	6.5 kWp
Potencia en AC	5.0 kW
Área estimada para el sistema	33 m ²

5.3.2. Diagrama unifilar

⁸ Como resultado de aplicación de la metodología explicada en el apartado 4.3 aplicada para los datos recolectados en el sitio "Caserío Aguacayo y Montañita".

En la figura 29 se muestra el diagrama unifilar del sistema propuesto. Se pretende que este diseño reduzca un 83% el consumo de energía eléctrica debido al bombeo.

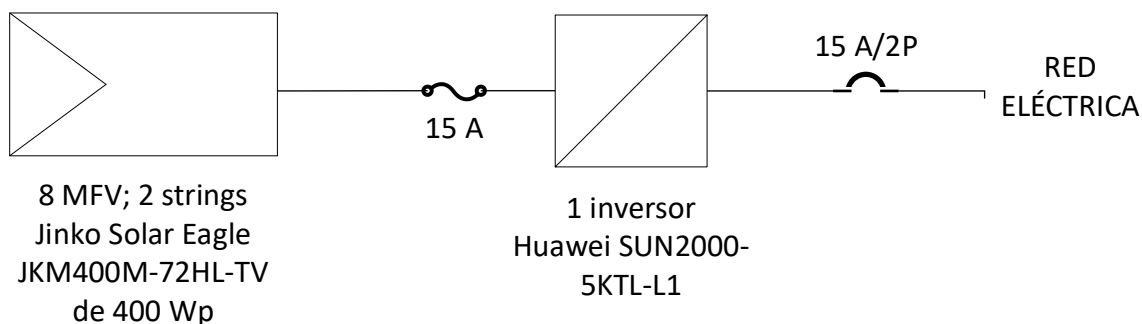


Figura 29. Diagrama unifilar para Caserios Aguacayo y Montañita. Elaboración propia.

5.4. Sitio 4: Distrito El Sauce

Luego de haber expuesto la realidad del sistema de distribución de agua del Distrito El Sauce en el apartado 3.4, se puede afirmar que el principal punto de mejora está en proponer un sistema que reduzca el consumo de energía eléctrica para producir un impacto directo en la facturación de este sistema.

Por tanto, se propondrá un sistema conectado a red que permita reducir la facturación asociada al consumo energético de la bomba sumergible que existe en la caseta de bombeo.

5.4.1. Diseño del sistema fotovoltaico conectado a red

El primer paso para el cálculo será determinar cuál sería la máxima potencia y producción permitida, considerando que se trabajaría bajo la modalidad UPR.

Por lo tanto, se verificó, a nivel de facturación y consumo, cuál ha sido su capacidad nominal y su consumo de energía a lo largo de un año. Para ello la

comunidad proporcionó la facturación existente desde 4 de agosto de 2023 hasta el 3 de enero de 2024. EL detalle de muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Histórico de facturación eléctrica para estación de bombeo Distrito El Sauce. Fuente: Directivos de Junta de Agua de El Sauce.

Mes	Energía [KWh]	Potencia [KW]
<i>Febrero</i>	6885.00	16.2
<i>Marzo</i>	6885.00	16.2
<i>Abril</i>	6885.00	16.2
<i>Mayo</i>	6885.00	16.2
<i>Junio</i>	6885.00	16.2
<i>Julio</i>	6885.00	16.2
<i>Agosto</i>	7196.50	16.2
<i>Septiembre</i>	7920.90	16.2
<i>Octubre</i>	6546.80	16.2
<i>Noviembre</i>	4834.40	16.2
<i>Diciembre</i>	6823.90	16.2
<i>Enero</i>	7996.20	16.2
Promedio	6885.00	16.2

Los datos importantes por considerar son los siguientes:

$$\text{Consumo mensual promedio} = 6885.00 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo acumulado 1 año} = 82628.70 \text{ kWh}$$

Con esta información procedemos a calcular la potencia máxima permitida para el sistema, para ello ocupamos los siguientes datos:

$$Yf = 1,754 \text{ kWh anual} / \text{kWp}$$

La producción anual máxima es 82628.70 kWh. No obstante, para cumplir el Art. 8 de la normativa UPR, se limitará a que los paneles fotovoltaicos suplan el 80% de la demanda, es decir, 66102.96 kWh/año.

$$\text{Potencia Máxima} = \frac{\text{Energía Máxima Generada}}{Yf \text{ anual}}$$

$$\text{Potencia Máxima} = \frac{66102.96 \text{ kWh/año}}{1,754 \text{ kWh/año/kWp}}$$

$$Potencia\ Máxima = 37.7\ kWp$$

Para el dimensionamiento del sistema se ha utilizado el software PVSyst 7.4. Se han seleccionado módulos fotovoltaicos Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV de 400 Wp e inversores Huawei SUN2000-12KTL-M2 de 12kW de potencia de salida. Además, se ha considerado paneles solares fijos con un ángulo de inclinación de 13° y azimut de 45° S-O⁹. Debido a la gran cantidad de montañas y laderas que existen en los alrededores del sitio propuesto para la instalación, se han considerado el sombreado de horizonte. En la tabla 23 se detalla el resumen del sistema.

Tabla 23. Resumen del sistema solar fotovoltaico conectado a red para Distrito El Sauce. Elaboración propia a través de PVSyst 7.4.

Módulo fotovoltaico	Jinko Solar Eagle JKM400M-72HL-TV
Cantidad de módulos por string	18
Inversor	Huawei SUN2000-12KTL-M2
Cantidad de inversores	3
Cantidad de strings/inversor	2
Numero de Módulos FV	108
Potencia fotovoltaica	43.7 kWp
Potencia en AC	36.0 kW
Área estimada para el sistema	221 m ²

5.4.1. Diagrama unifilar

En la figura 30 se muestra el diagrama unifilar del sistema propuesto. Se pretende que este diseño reduzca un 82% el consumo de energía eléctrica debido al bombeo.

⁹ Como resultado de aplicación de la metodología explicada en el apartado 4.3 aplicada para los datos recolectados en el sitio "Distrito El Sauce".

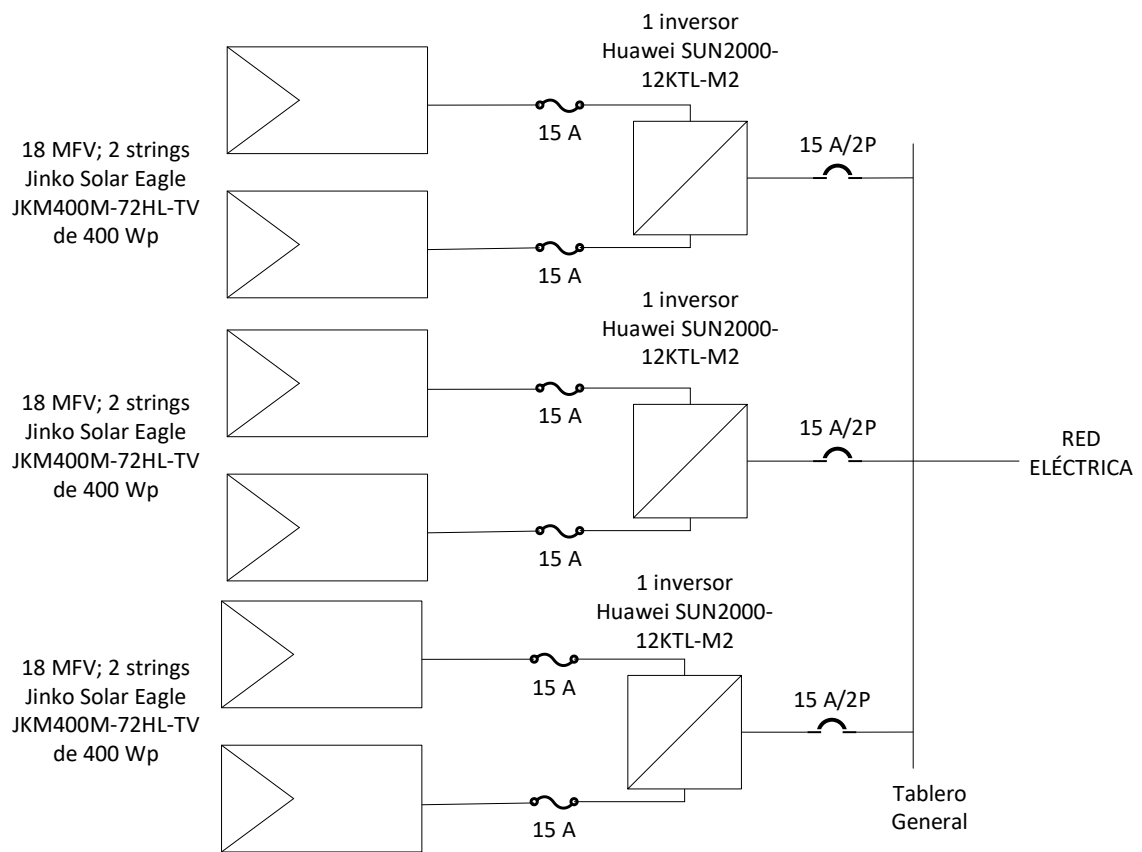


Figura 30. Diagrama unifilar para Distrito El Sauce. Elaboración propia.

6. Estudio económico

6.1. Sitio 1: Caserío San Antonio La Labor

6.1.1. Análisis económico para sistema conectado a red

Para comenzar la evaluación económica, el primer paso fue determinar el costo económico del proyecto que se muestra en la tabla 24, para lo cual se ha utilizado cotizaciones de páginas en línea y precios de componentes eléctricos en el país.

Los costos estimados para este proyecto son:

Tabla 24. Costos de sistema solar conectado a red Caserío San Antonio La Labor. Fuente: elaboración propia.

Elemento	Sitio 1 - La Labor - Sistema CR			
	Cantidad	PU	Costo Total	Modelo
Paneles	4	\$ 182.03	\$ 728.12	JKM400M-72HL-TV
Estructura Paneles	4	\$ 33.40	\$ 133.60	
Inversor	1	\$ 461.70	\$ 461.70	Growatt MIC 1500TL-X
Flete Paneles + Inversor	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00	
Fusible a salida arreglo fotovoltaico	1	\$ 27.22	\$ 27.22	NH-300016/gL-gG/C-00
Fusible Entrada Inversor	1	\$ 23.25	\$ 23.25	NH-00 de 16A(500/690 Vac)
Fusible Salida Inversor	1	\$ 3.39	\$ 3.39	NH-00 de 6A(500/690 Vac)
Cable Arreglo Fotovoltaico	75	\$ 2.17	\$ 162.75	Cable 6AWG
Cable Salida Inversor	10	\$ 0.43	\$ 4.30	Cable 14 AWG
Total Insumos			\$	3,044.33
MO			\$	913.30
COSTO TOTAL ESTIMADO			\$	3,957.63

Ahora se calcula la reducción de costos, para ello se asume que los horarios de uso de la bomba serán en el transcurso del día, por lo tanto, se reducirá consumo de energía directamente.

Los datos necesarios para el cálculo son los siguientes:

Categoría tarifaria: G – General

Tarifa Energía (\$/kWh): 0.188268 \$/kWh

Inyección estimada anual (kWh): 2856.8 kWh

Con esto se procede a calcular el ahorro en consumo mensual y anual.

Ahorro Anual:

$$\text{Ahorro anual} = (\text{Inyección estimada anual}) * (\text{Tarifa de energía})$$

$$\text{Ahorro anual} = \$537.84 \text{ por año}$$

Ahorro Mensual:

$$\text{Ahorro mensual} = \text{Ahorro anual} / 12$$

$$\text{Ahorro mensual} = \$44.82$$

Retorno de la inversión:

Para el cálculo del retorno simple de la inversión, se toma el ahorro anual como los ingresos y el costo total como la inversión del proyecto, por lo tanto, los cálculos son los siguientes:

$$\text{Retorno de la inversión} = \text{Inversión inicial} / \text{Ahorro anual}$$

$$\text{Retorno de la inversión} = \$3,957.63 / \$537.84 = 7.4 \text{ años}$$

Es decir que en aproximadamente 7 años se estará recuperando la inversión en el proyecto, lo cual es económicamente atractivo ya que por lo general la vida útil de estos proyectos es de 25 años.

Valor Actual Neto (VAN)

Para el cálculo de la VAN se asumirá un tiempo del proyecto de 20 años (aunque la duración ronda los 25 años):

Se utiliza una fuente de financiamiento externa y se le asigna una tasa de interés del 6%.

Fórmula de la VAN a utilizar:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+i)^t} - I_0$$

Donde:

V_t = Flujo de efectivo de cada período.

I_0 = Inversión inicial del proyecto.

n = Cantidad de períodos del proyecto.

i = Tasa de interés del préstamo.

Es necesario evaluar el proyecto con una tasa de interés, sin embargo, como no se tiene tasa de interés se asumirá una del 6% dado que es un proyecto de carácter social. Para los flujos de efectivo para cada año, los cálculos son los siguientes:

Flujos	
1	\$ 507.40
2	\$ 478.68
3	\$ 451.58
4	\$ 426.02
5	\$ 401.91
6	\$ 379.16
7	\$ 357.70
8	\$ 337.45
9	\$ 318.35
10	\$ 300.33
11	\$ 283.33
12	\$ 267.29
13	\$ 252.16
14	\$ 237.89
15	\$ 224.42
16	\$ 211.72

Habiendo calculado el monto de los flujos mensuales, solamente se resta la inversión inicial y el resultado sería el siguiente:

$$VAN = \$2,211.40$$

Dado que la VAN es positiva el proyecto se toma como viable. Solamente faltaría evaluar el proyecto con la Tasa Interna de Retorno.

17	\$	199.74
18	\$	188.43
19	\$	177.76
20	\$	167.70

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La fórmula de la TIR es la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0$$

Por lo tanto, para el proyecto considerado para 5 años, con una tasa de interés del 6% el proyecto es viable según la TIR y la VAN.

Para este cálculo se utilizó nuevamente los flujos obtenidos anteriormente.

$$TIR = 5.9\%$$

6.1.2. Análisis económico para sistema independiente

Los costos estimados para esta propuesta de solución se muestran en la tabla 25.

Tabla 25. Costos de sistema solar independiente de la red Caserío San Antonio La Labor. Fuente: elaboración propia.

Elemento	Sitio 1 - La Labor - Sistema Aislado			
	Cantidad	PU	Costo Total	Modelo
Paneles	28	\$ 182.03	\$ 5,096.84	JKM400M-72HL-TV
Estructura Paneles	28	\$ 33.40	\$ 935.20	
Bombas + Controlador	2	\$ 3,612.45	\$ 7,224.90	Lorentz CS-F20-7 / PSk2-9
Flete Paneles + Inversor	1	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00	
Fusible Entrada del Controlador	2	\$ 23.25	\$ 46.50	NH-00 de 15A(500/690 Vac)
Fusible Entrada de la Bomba	2	\$ 3.39	\$ 6.78	NH-00 de 10A(500/690 Vac)
Cable Arreglo Fotovoltaico	100	\$ 2.17	\$ 217.00	Cable 6AWG
Cable Salida Inversor	10	\$ 0.43	\$ 4.30	Cable 14 AWG
Cableado a bomba	200	\$ 0.97	\$ 194.00	Cableado #10THHN
Tuberías	33	\$ 36.25	\$ 1,196.25	4 in
Tanque de Captación	1	\$ 2,000.00	\$ 2,000.00	10,000 Litros
Total MP			\$	17,921.77
MO			\$	5,376.53
COSTO TOTAL ESTIMADO			\$	23,298.30

Ahora se presentan los resultados de las evaluaciones económicas para este proyecto:

Tabla 26. Resultado de evaluación económica para sistema independiente de la red Caserío San Antonio La Labor. Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS	
<i>Ahorro Anual</i>	\$ 1,757.20
<i>Ahorro Mensual</i>	\$ 146.43
<i>Retorno de Inversion</i>	13
<i>TIR</i>	-1.6%
<i>VAN con interés</i>	\$ (3,143.36)

En este caso, aunque se obtiene un resultado aceptable para el retorno de la inversión, la TIR y la VAN no resultan ser positivas. Sin embargo, al tratarse de un proyecto de carácter social, se debe considerar la gran cantidad de familias que serán beneficiadas con el servicio de agua potable.

Beneficio Social del Proyecto

Al ser los proyectos de carácter social, es importante resaltar que la calidad de vida de muchas familias se verá beneficiada con su ejecución, a continuación, se resaltan las más importantes:



Continuidad del agua potable. Servicio 24 h



452 habitantes beneficiados



Ahorro de hasta \$1,700 anuales

6.2. Sitio 2: Caserío Casa Blanca

Los costos estimados para esta propuesta de solución se muestran en la tabla 27.

Tabla 27. Costos de sistema solar independiente de la red Caserío Casa Blanca. Fuente: elaboración propia.

Elemento	Sitio 2 - Casa Blanca - Sistema Aislado			
	Cantidad	PU	Costo Total	Modelo
Paneles	56	\$ 182.03	\$ 10,193.68	JKM400M-72HL-TV
Estructura Paneles	56	\$ 33.40	\$ 1,870.40	
Bomba Sumergible + Controlador	2	\$ 3,406.00	\$ 6,812.00	Franklin Electric 100FA7S6-PE
Flete Paneles + Inversor	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00	
Fusible Entrada Inversor	2	\$ 23.25	\$ 46.50	NH-00 de 15A(500/690 Vac)
Fusible Salida Inversor	2	\$ 23.25	\$ 46.50	NH-00 de 15A(500/690 Vac)
Cable Arreglo Fotovoltaico	100	\$ 2.17	\$ 217.00	Cable 6AWG
Cable Salida Inversor	50	\$ 0.43	\$ 21.50	Cable 14 AWG
Cableado a bomba	200	\$ 0.97	\$ 194.00	Cableado #10THHN
Tuberías	67	\$ 36.25	\$ 2,428.75	3 pulgadas
Tanque de Captación	1	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00	50,000 Litros
Total Insumos			\$	33,330.33
MO			\$	9,999.10
COSTO TOTAL ESTIMADO			\$	43,329.43

En la tabla 28, se muestran los resultados de la evaluación económica para la alternativa de solución planteada.

Tabla 28. Resultado de evaluación económica para sistema independiente de la red Caserío Casa Blanca. Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS	
Ahorro Anual	\$ 2,862.64
Ahorro Mensual	\$ 238.55
Retorno de Inversión	15
TIR	-3.0%
VAN	\$ (10,495.20)

Con los resultados de este proyecto se puede concluir que desde el punto de vista de la TIR y la VAN no resulta rentable, sin embargo, para la vida útil del proyecto tiene un retorno de inversión aceptable que es de 15 años y adicional, se debe considerar que representa mejor muy significativas para la comunidad.

Beneficio Social del Proyecto

Actualmente la comunidad cuenta con servicio de agua potable limitado (depende de la capacidad del tanque actual y puede ser entre 4 a 6 horas al día). Los beneficios sociales para las familias de la comunidad del Caserío Casa Blanca se resumen a continuación, siendo uno de los principales, la continuidad del servicio de agua potable:



Continuidad del agua potable. Servicio 24 h



450 habitantes beneficiados



Ahorro de más de \$2,800 anuales

6.3. Sitio 3: Caserío Aguacayo y Montañita

Los costos estimados para esta propuesta de solución se muestran en la tabla 29.

Tabla 29. Costos de sistema solar conectado a red Caserío Aguacayo y Montañita. Fuente: elaboración propia.

Elemento	Sitio 3 - Aguacayo y Montañita			
	Cantidad	PU	Costo Total	Modelo
Paneles	16	\$ 182.03	\$ 2,912.48	JKM400M-72HL-TV
Estructura Paneles	16	\$ 33.40	\$ 534.40	
Inversor	1	\$ 824.31	\$ 824.31	Huawei SUN2000-5KTL-L1
Flete Paneles + Inversor	1	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00	
Fusible Entrada Inversor	2	\$ 23.25	\$ 46.50	NH-00 de 15A(500/690 Vac)
Fusible Salida Inversor	2	\$ 23.25	\$ 46.50	NH-00 de 15A(500/690 Vac)
Cable Arreglo Fotovoltaico	75	\$ 2.17	\$ 162.75	Cable 6AWG
Cable Salida Inversor	10	\$ 0.43	\$ 4.30	Cable 14 AWG
Total Insumos			\$	5,531.24
MO			\$	1,659.37
COSTO TOTAL ESTIMADO			\$	7,190.61

En la tabla 30, se muestran los resultados de la evaluación económica para la alternativa de solución planteada.

Tabla 30. Resultado de evaluación económica para sistema independiente de la red Caserío Aguacayo y Montañita. Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS	
<i>Ahorro Anual</i>	\$ 1,139.31
<i>Ahorro Mensual</i>	\$ 94.94
<i>Retorno de Inversión</i>	6
<i>TIR</i>	8.3%
<i>VAN con interés</i>	\$ 5,877.16

En este caso, se obtiene un resultado positivo para todos los indicadores ya que representa un ahorro muy significativo y con una inversión inicial relativamente baja.

Beneficio Social del Proyecto

Esta comunidad tiene continuidad en su servicio gracias a la gestión que se realiza del sistema, sin embargo, tiene costos elevados. Los beneficios para las familias de la comunidad del Caserío Aguacayo y Montañita se resumen a continuación:



342 habitantes beneficiados



Ahorro de más de \$1,100
anuales

6.4. Sitio 4: Distrito El Sauce

Los costos estimados para esta propuesta de solución se muestran en la tabla 31.

Tabla 31. Costos de sistema solar conectado a red Distrito El Sauce. Fuente: elaboración propia.

Elemento	Sitio 4 - El Sauce			
	Cantidad	PU	Costo Total	Modelo
Paneles	108	\$ 182.03	\$ 19,659.24	JKM400M-72HL-TV
Estructura Paneles	108	\$ 33.40	\$ 3,607.20	
Inversor	3	\$ 2,164.74	\$ 6,494.22	Huawei SUN2000-12KTL-M2
Flete Paneles + Inversor	1	\$ 2,000.00	\$ 2,000.00	
Fusible Entrada Inversor	2	\$ 23.25	\$ 46.50	NH-00 de 15A(500/690 Vac)
Fusible Salida Inversor	2	\$ 23.25	\$ 46.50	NH-00 de 15A(500/690 Vac)
Cable Arreglo Fotovoltaico	75	\$ 2.17	\$ 162.75	Cable 6AWG
Cable Salida Inversor	10	\$ 2.17	\$ 21.70	Cable 6 AWG
Total Insumos			\$ 32,038.11	
MO			\$ 9,611.43	
COSTO TOTAL ESTIMADO			\$ 41,649.54	

En la tabla 32, se muestran los resultados de la evaluación económica para la alternativa de solución planteada.

Tabla 32. Resultado de evaluación económica para sistema independiente de la red Distrito EL Sauce. Fuente: elaboración propia.

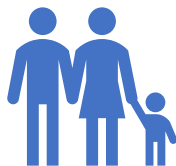
RESULTADOS	
Ahorro Anual	\$ 8,024.59
Ahorro Mensual	\$ 668.72
Retorno de Inversion	5
TIR	11.9%
VAN	\$ 50,391.90

Para el último caso, pese a tener una inversión inicial (\$41,649.54) el retorno de la inversión es bastante rápido al igual que los resultados para la TIR y la VAN del proyecto, por lo que resulta ser el proyecto más rentable económicamente de los 4 propuestos.

Beneficio Social del Proyecto

Esta es la comunidad más grande del proyecto y la que tiene una administración relativamente formal y también es la comunidad en la que se verán beneficiadas una mayor cantidad de personas ya que su mayor problema no es

la continuidad, sino, los elevados costos del agua potable. Los beneficios que obtendrán las personas de la comunidad del Sauce con el proyecto serían:



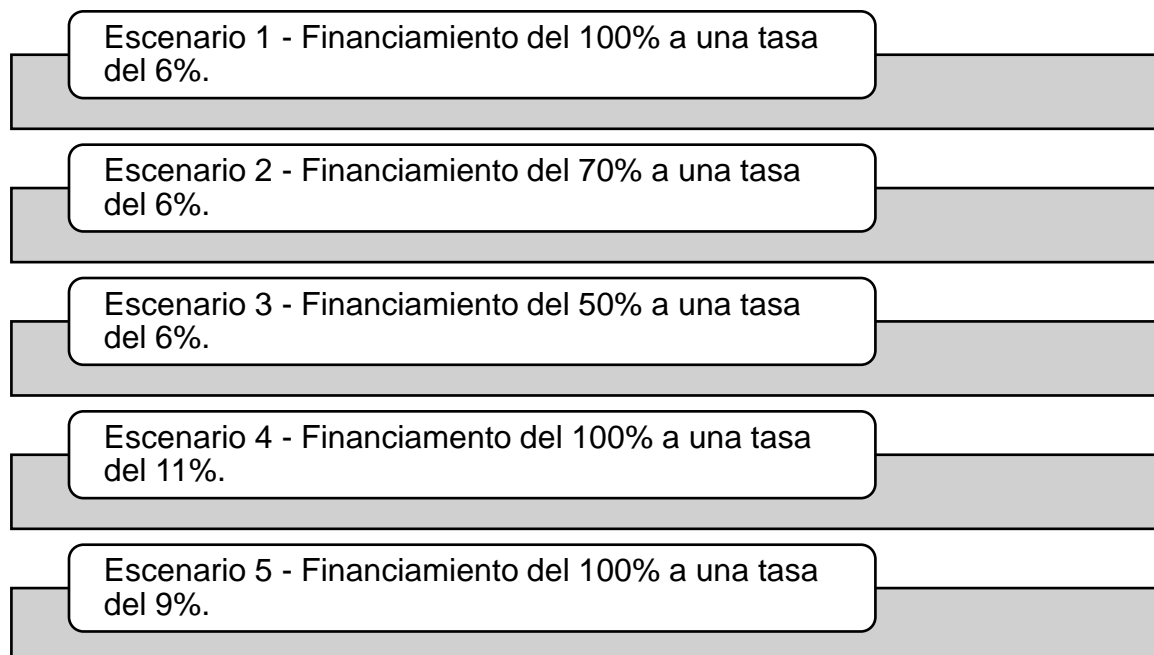
2056 habitantes beneficiados



Ahorro de más de \$8,000
anuales

6.5. Análisis de sensibilidad

Para el estudio económico, se asumió que la comunidad, buscaría financiamiento del 100% de los fondos (a manera de préstamo al 100% del monto y con un 6% de tasa de interés), por lo que se realizará una evaluación de ciertos escenarios para ver cuál sería el comportamiento de los proyectos bajo diferentes condiciones, los escenarios se describen a continuación:



Como se observa, se han considerado escenarios positivos, en los que se recibe ayuda externa y solamente se necesita un porcentaje de inversión de la

comunidad para la ejecución del proyecto y escenarios negativos, en los que se realiza el préstamo a una tasa mayor a la considerada en el escenario original. Los resultados de dichas evaluaciones y sus indicadores principales (TIR y VAN) se muestran en la tabla 33.

Tabla 33. Resultados del análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.

	Sitio 1	Sitio 1 - Aislado	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4
<i>Inversión Inicial</i>	\$ 3,957.63	\$ 23,298.30	\$ 43,329.43	\$ 7,190.61	\$ 41,649.54
<i>VAN Escenario 1</i>	\$ 2,211.40	\$ (3,143.36)	\$ (10,495.20)	\$ 5,877.16	\$ 50,391.90
<i>VAN Escenario 2</i>	\$ 3,398.69	\$ 3,846.13	\$ 2,503.63	\$ 8,034.34	\$ 62,886.76
<i>VAN Escenario 3</i>	\$ 4,190.21	\$ 8,505.79	\$ 11,169.51	\$ 9,472.47	\$ 71,216.67
<i>VAN Escenario 4</i>	\$ 325.40	\$ (9,305.14)	\$ (20,533.31)	\$ 1,882.07	\$ 22,252.92
<i>VAN Escenario 5</i>	\$ 952.10	\$ (7,257.63)	\$ (17,197.71)	\$ 3,209.61	\$ 31,603.31

	Sitio 1	Sitio 1 - Aislado	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4
<i>Inversión Inicial</i>	\$ 3,957.63	\$ 23,298.30	\$ 43,329.43	\$ 7,190.61	\$ 41,649.54
<i>TIREscenario 1</i>	5.9%	-1.6%	-3.0%	8.3%	11.9%
<i>TIREscenario 2</i>	12.1%	2.6%	0.9%	15.3%	20.1%
<i>TIREscenario 3</i>	19.8%	7.5%	5.5%	24.1%	30.6%
<i>TIREscenario 4</i>	1.1%	-6.1%	-7.4%	3.5%	6.9%
<i>TIREscenario 5</i>	3.0%	-4.3%	-5.7%	5.4%	8.8%

Como se observa en los resultados, los proyectos 3 y 4 siguen siendo rentables económicamente aún en los escenarios negativos, en el caso de los sitios 1 y 2, al tener costos relativamente mayores tienden a verse afectados ante las variaciones sobre las condiciones iniciales, sin embargo, para los escenarios positivos su rentabilidad tiende a mejorar considerablemente.

Se toma en cuenta también que para los Sitios 1 y 2, la ejecución de los proyectos produciría una mejoría muy considerable para los habitantes, ya que estas 2 comunidades son las que tienen servicios de agua potable más irregulares.

CONCLUSIONES

Con base al resultado del estudio realizado, se concluye lo siguiente:

- La implementación de sistemas solares fotovoltaicos en las zonas de estudio representa una alternativa viable y sostenible para mejorar la calidad de vida de las comunidades beneficiadas, promoviendo simultáneamente el uso de energías renovables y el desarrollo económico local. Desde el punto de vista técnico, es viable debido a los adecuados niveles de irradiancia existentes a lo largo del país, que se pudo constatar con los 4 sitios visitados cubriendo todo el territorio nacional y promediando 5.88 Horas Sol Pico; además, por la abundante disponibilidad de terreno en zonas rurales. Desde el punto de vista económico, se considera viable bajo la condición que exista un financiamiento de al menos el 50% del monto total del proyecto a una tasa de interés del 6%, como lo confirma el análisis de sensibilidad realizado. Es importante resaltar que este tipo de proyectos su rentabilidad no solo depende de lo económico, sino, y más importante, su impacto social, el cual, para todas las comunidades mejoraría el suministro de agua en cantidad y continuidad, dos aspectos básicos para garantizar el derecho humano al agua y saneamiento.
- Se realizaron visitas a cuatro sistemas de abastecimiento de agua potable los cuales abastecen al menos a siete comunidades, resaltando que todos los sistemas visitados utilizan bombeo electromecánico para llevar agua de la fuente hasta tanques elevados que luego distribuyen agua por gravedad a cada acometida.

- Como resultado de la visita técnica se encontraron tres tipos de fuentes de abastecimiento: manantial, lago y pozo profundo, siendo este último el más frecuente. Respecto al estado de la infraestructura hidráulica existente, se pudo verificar en campo que dos de los sistemas presentan serios problemas (San Antonio La Labor y Casa Blanca) lo cual deriva en altos costos de energía eléctrica debido al pobre o inexistente base técnica de la selección de componentes hidráulicos y la potencia de la bomba.
- Para la estimación del costo de energía eléctrica para la distribución de agua se tomó en cuenta los ingresos por distribución con respecto a los gastos como el consumo de energía, siendo 15% para el Caserío San Antonio La Labor, 52% para Caserío Casa Blanca, 28% para Caserío Aguacayo y Montañita, y 51.5% para distrito El Sauce. Este indicador confirma la problemática planteada y da paso a la propuesta de soluciones por sitio.
- En cuanto al recurso solar disponible en cada sitio analizado, éste se estimó en promedio de 5.88 horas de sol pico; dato tomado mediante la base de datos Meteorom 8.1.
- Uno de los aportes más importantes de este estudio es la presentación de una metodología para identificar los mejores sitios para la ubicación de paneles solares haciendo uso de imágenes satelitales a través del software QGIS y el complemento GRASS. La metodología es una herramienta útil para visualizar en un mapa los sitios que naturalmente están orientados hacia el sur, los sitios donde se concentra la mayor irradiancia solar y, si se tiene la

información, ver la distribución de la línea eléctrica. El acceso a esta información permite tomar una decisión sobre dónde localizar los paneles solares de forma más informada, principalmente, cuando la morfología del terreno es complicada para acceder por cuenta propia.

- Se planteó una propuesta de solución por sitio visitado, la cual, está enfocada en los siguientes aspectos: mejorar la continuidad del agua (que cada familia tenga acceso a agua 24/7) y garantizar la sostenibilidad del sistema, es decir, que el servicio de agua esté garantizado para al menos 20 años. Con base a las propuestas, se pueden identificar dos diseños tipo optimizados que se han propuesto acorde a las necesidades de cada sitio. El primer diseño tipo es un sistema solar fotovoltaico conectado a red, este pretende reducir la facturación de energía eléctrica para impactar directamente en el bolsillo de cada familia a través de una reducción en la tarifa. Este tipo de diseño se propuso en los sitios que tienen una continuidad de servicio bastante aceptable (El Sauce y Aguacayo y Montañita). El segundo diseño tipo es un sistema de bombeo solar totalmente independiente de la red. Este sistema pretende mejorar la continuidad del servicio a través de bombear mayor cantidad de agua a un nuevo tanque elevado que es capaz de tener una autonomía de 24 horas. Este sistema fue propuesto para aquellos sistemas que tienen deficiencia en la continuidad del servicio (La Labor y Casa Blanca) y se consideró el crecimiento poblacional de los sitios para 20 años, de esta manera, se garantiza que el sistema propuesto tenga una sostenibilidad adecuada.

- El estudio económico realizado para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en los cuatro sitios (Caserío San Antonio La Labor, Caserío Casa Blanca, Caserío Aguacayo y Montañita, y Distrito El Sauce), ha permitido identificar su viabilidad financiera. Los resultados indican que, si bien la inversión inicial de los sistemas solares fotovoltaicos es significativa (entre \$4,000 hasta \$43,000 para el sistema más grande), los beneficios a mediano y largo plazo son sustanciales (hasta \$2,800 de ahorro anual), tanto en términos de reducción de costos operativos como en mejora del acceso al agua potable para las comunidades beneficiadas.
- El análisis económico comparativo entre los sistemas fotovoltaicos conectados a red y los sistemas independientes revela que en la mayoría de los casos presentan tasas internas de retorno (TIR) y valores actuales netos (VAN) positivos y, en los casos que resultan negativos tienen un impacto muy alto en los beneficios sociales para la comunidad, lo que los convierte en opciones viables desde una perspectiva financiera. Además, el estudio de sensibilidad confirma que los sistemas propuestos mantienen su viabilidad económica incluso ante fluctuaciones en variables críticas como los costos de inversión y la tarifa de energía eléctrica.
- Se destaca el impacto social positivo al reducir el costo del servicio de agua para las familias de estas comunidades, permitiendo un acceso más equitativo y confiable a este recurso vital con hasta un alcance de 3,000 habitantes beneficiados entre los cuatro proyectos. Para los cuales, en los casos específicos de Caserío La Labor y Caserío Casa Blanca, aumentaría

considerablemente la disponibilidad del agua potable ya que estarían pasando de tener una disponibilidad de entre 4 – 8 horas al día a tener agua potable las 24 horas del día.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asociación Fénix. (2006). Sistema de Bombeo de Agua Accionado por Energía Solar FV aplicado al riego por goteo para la producción de Flores y Hortalizas. Nueva Segovia.

Cortez Méndez, Carlos Enrique; Menjívar Urquilla, Edgard Alexander y Padilla Marroquín, Lester Enrique (2014) Actualización del Mapa de Radiación Solar de El Salvador. Doctorado en Ingenierías thesis, Universidad de El Salvador.

G. Delgado, S. M. (2016). Factibilidad técnica y económica para la implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico para una zona de riego agrícola. Santa Ana.

Girma, M., Assefa, A., & Molinas, M. (2015). Feasibility study of a solar photovoltaic water pumping system for rural Ethiopia. *AIMS Environmental Science*, 2(3), 697–717. <https://doi.org/10.3934/environsci.2015.3.697>

Kunen, E., Pandey, B., Foster, R., Holthaus, J., Shrestha, B., & Ngetich, B. (2015). Solar water pumping: Kenya and Nepal market acceleration. *ISES Solar World Congress 2015, Conference Proceedings*, 1658–1669. <https://doi.org/10.18086/swc.2015.03.04>

Li, G., Jin, Y., Akram, M. W., & Chen, X. (2017). Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system – A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 79, pp. 440–458). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.055>

MARN, UCA. (2005). Determinación del Potencial Solar y Eólico en El Salvador. San Salvador.

Setiawan, A. A., Purwanto, D. H., Pamuji, D. S., & Huda, N. (2014). Development of a solar water pumping system in karsts rural area tepus, gunungkidul through student community services. *Energy Procedia*, 47, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.190>

SICA. (2013). Monitoreo de los avances de país en agua potable y saneamiento (MAPAS). San Salvador.

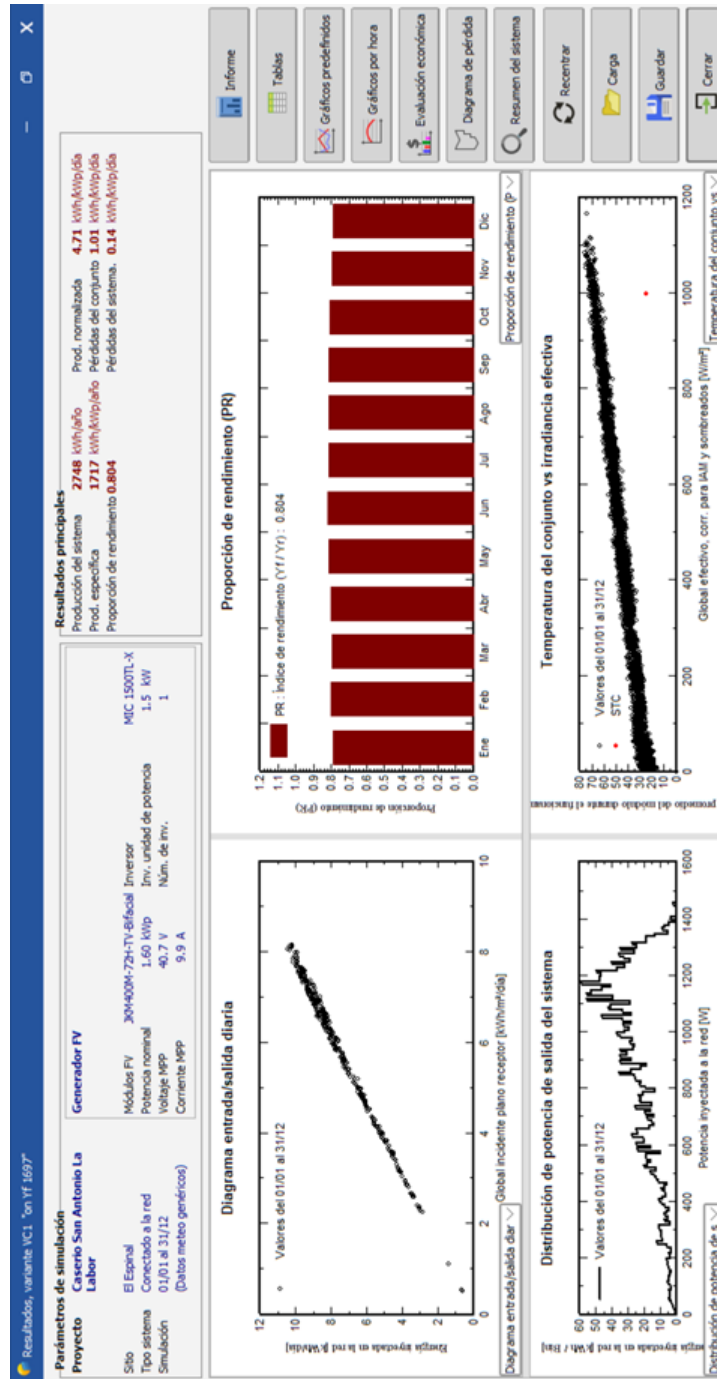
Solargis (2021). Solar resource maps of El Salvador. Extraído de: <https://solargis.com>

SOLARGIS. (2018). Mapas de recursos solares. Obtenido de <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/el-salvador>

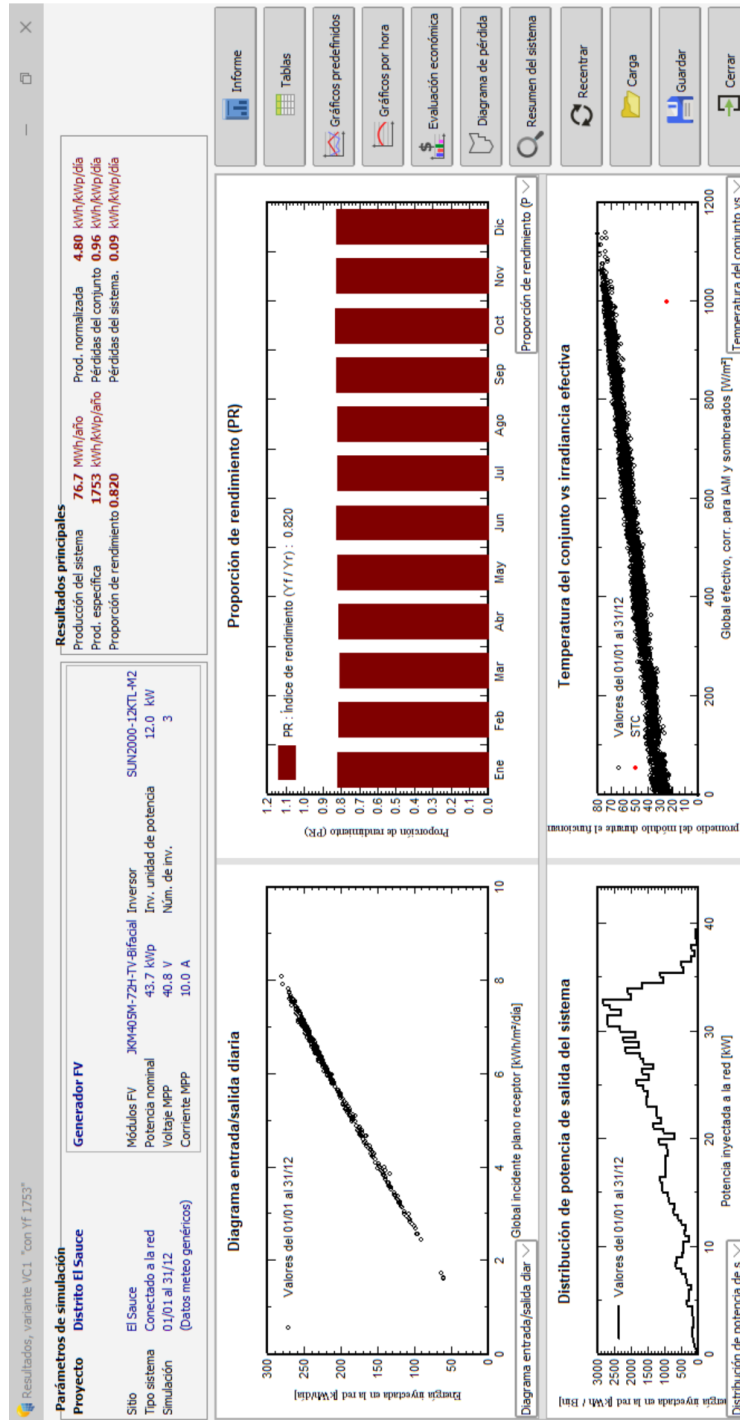
VIELCA. (2015). Diagnóstico de los sistemas de agua potable y saneamiento rurales no administrados por ANDA.

ANEXOS

ANEXO A. Resultado de simulación en PVSyst para propuesta de diseño solar fotovoltaico conectado a red de Caserío San Antonio La Labor.



ANEXO B. Resultado de simulación en PVSyst para propuesta de diseño solar fotovoltaico conectado a red de Caseríos Aguacayo y Montañita.



ANEXO C. Resultado de simulación en PVSyst para propuesta de diseño solar fotovoltaico conectado a red de Distrito El Sauce.

