



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
APLICADAS**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ALIMENTACIÓN
ENERGÉTICA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO Y LA
EFICIENCIA DE UN CONJUNTO DE BOMBAS, GARANTIZANDO
UN SUMINISTRO CONFIABLE.**

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRICIDAD

AUTOR(ES):

José Alfredo Coray Taco

Juan Daniel Oña Aimacaña

TUTOR:

Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza, Mgtr.

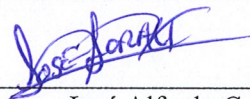
LATACUNGA, MARZO 2026

Latacunga, marzo 06 del 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo **José Alfredo Coray Taco** declaro ser autor del proyecto de titulación **“DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO Y LA EFICIENCIA DE UN CONJUNTO DE BOMBAS, GARANTIZANDO UN SUMINISTRO CONFIABLE”**, siendo el Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza MSc. Tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.




José Alfredo Coray Taco
C.C: 0504354374

Latacunga, marzo 06 del 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo **Juan Daniel Oña Aimacaña** declaro ser autor del proyecto de titulación **“DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO Y LA EFICIENCIA DE UN CONJUNTO DE BOMBAS, GARANTIZANDO UN SUMINISTRO CONFIABLE”**, siendo el Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza MSc. Tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.

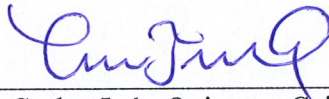


Juan Daniel Oña Aimacaña
C.C: 0550303432

Latacunga, marzo 06 del 2026

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO Y LA EFICIENCIA DE UN CONJUNTO DE BOMBAS, GARANTIZANDO UN SUMINISTRO CONFIABLE”**, propuesto por los estudiantes José Alfredo Coray Taco, Juan Daniel Oña Aimacaña de la Carrera de Electricidad, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza MSc.

C.C. 0503287864

TUTOR

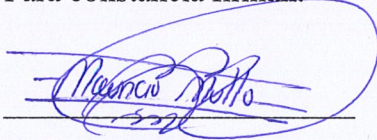
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Proyecto de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: José Alfredo Coray Taco; Juan Daniel Oña Aimacaña con el título del Proyecto de Investigación: **“DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO Y LA EFICIENCIA DE UN CONJUNTO DE BOMBAS, GARANTIZANDO UN SUMINISTRO CONFIABLE”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 11 de marzo del 2026

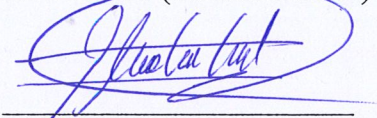
Para constancia firman:



Ing. Mauricio Eduardo Mullo Pallo, Mgtr.

C.C: 0503755183

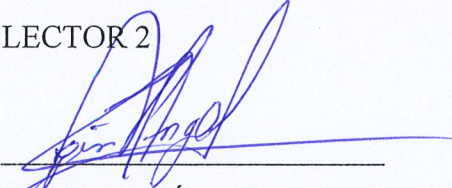
LECTOR 1 (PRESIDENTE)



Ing. Marco Aníbal León Segovia, Mgtr.

C.C: 0502305402

LECTOR 2



Ing. Manuel Ángel León Segovia, Mgtr.

C.C: 0502041353

LECTOR 3

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios por brindarme la salud, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar con éxito esta etapa de mi vida académica.

Agradezco profundamente a mis padres y a mi familia, quienes, con su amor, apoyo incondicional, comprensión y sacrificio han sido el pilar fundamental para alcanzar este logro. Su confianza y motivación constante han sido esenciales durante todo mi proceso de formación.

De igual manera, expreso mi agradecimiento a mi tutor de tesis, por compartir sus conocimientos, orientación y valiosos consejos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

JOSE CORAY

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis, en primer lugar, a Dios por darme la vida, la sabiduría y la fortaleza necesaria para culminar esta importante etapa de mi vida. A mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y apoyo incondicional han sido el pilar fundamental en mi formación personal y académica.

A mi familia, por su comprensión, paciencia y motivación constante durante todo este proceso, brindándome ánimo en los momentos difíciles y celebrando conmigo cada logro alcanzado.

También dedico este trabajo a mis docentes y a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron con sus conocimientos, consejos y apoyo para la realización de esta tesis.

JOSE CORAY

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser guía y compañero en el camino de mi vida, a mi madre Yolanda Aimacaña y mi novia Rosita Ibañez que estuvo conmigo en todo momento.

A mis amigos de la facultad gracias por todos esos grandes momentos y experiencias vividas en mi etapa universitaria. A la Universidad Técnica de Cotopaxi por acogerme en este largo recorrido, y a los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica por haber compartido sus conocimientos.

Quiero agradecer de manera especial a nuestro tutor de tesis Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza, Mgtr. quien nos guio en las investigaciones utilizando su experiencia, conocimiento, motivación y sobre todo por la exigencia para culminar de la mejor manera nuestro proyecto.

Agradezco a todos los docentes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Carrera de Ingeniería Eléctrica, cuya sabiduría, conocimiento y apoyo me han inspirado a crecer personal y profesionalmente.

DANIEL OÑA

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado a mi familia y hermanos, principalmente a mis padres por ser ese gran pilar fundamental en mi formación profesional. Mamá gracias por tu apoyo moral incondicional que me brindaste para seguir adelante. Papá gracias por brindarme esa confianza. Finalmente, a mi novia, por estar siempre en esos momentos difíciles brindándome ese cariño y amor. A mis padres, hermanos y a mi familia.

A mis padres, hermanos y a mi familia.

DANIEL OÑA

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO Y LA EFICIENCIA DE UN CONJUNTO DE BOMBAS, GARANTIZANDO UN SUMINISTRO CONFIABLE”

AUTORES:

José Alfredo Coray Taco

Juan Daniel Oña Aimacaña

RESUMEN

El suministro continuo de agua potable es un servicio fundamental para las comunidades rurales, sin embargo, en el sector Chan Chico el sistema de bombeo depende exclusivamente de la red eléctrica convencional. Esta situación genera vulnerabilidad en el abastecimiento de agua cuando se presentan interrupciones en el servicio eléctrico afectando la regularidad del suministro y el bienestar de los habitantes frente a esta problemática surge la necesidad de analizar alternativas energéticas que permitan mejorar la confiabilidad del sistema. Esta investigación tiene como objetivo analizar los indicadores de factibilidad y el rendimiento energético asociados a la implementación de un sistema fotovoltaico ON-GRID destinado al abastecimiento eléctrico de un sistema de bombeo de agua. Para el desarrollo del estudio se evaluó el consumo energético del sistema de bombeo mediante el análisis datos de medición eléctrica, además se realizó la estimación del recurso solar disponible en la zona y el dimensionamiento del sistema fotovoltaico considerando las condiciones operativas del sistema y los parámetros técnicos de los módulos solares, con base en esta información se analizaron indicadores de factibilidad del proyecto. Los resultados obtenidos evidencian que en los indicadores de factibilidad no es viable por el costo de inversión, pero el uso de energía solar fotovoltaica representa una alternativa viable para complementar el suministro eléctrico del sistema de bombeo, permitiendo reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y mejorar la continuidad del servicio de agua.

Palabras clave: energía solar, sistema fotovoltaico, sistema bombeo, irradiación solar.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TITLE: “Design of a Hybrid Energy Supply System to Optimize the Operation and Efficiency of a Pump Set, Ensuring a Reliable Supply”

AUTHORS:

José Alfredo Coray Taco

Juan Daniel Oña Aimacaña

ABSTRACT

The continuous supply of drinking water is an essential service for rural communities. However, in the Chan Chico sector the pumping system depends exclusively on the conventional electrical grid. This situation creates vulnerability in the water supply when power outages occur, affecting the regularity of the service and the well-being of the inhabitants. In response to this problem, it is necessary to analyze alternative energy sources that could improve the reliability of the system.

The objective of this research is to analyze the feasibility indicators and the energy performance related to the implementation of an on-grid photovoltaic system designed to supply electricity to a water pumping system. For the development of this study, the energy consumption of the pumping system was evaluated through the analysis of electrical measurement data. In addition, the available solar resource in the area was estimated, and the photovoltaic system was sized considering the operating conditions of the pumping system and the technical parameters of the solar modules.

Based on this information, the feasibility indicators of the project were analyzed. The results show that the project is not economically viable, since the Internal Rate of Return (IRR) is only 1%, mainly due to the low electricity tariff established for water pumping systems used by rural communities.

Keywords: solar energy, photovoltaic system, pumping system, solar irradiation.

ÍNDICE

Contenido

1	INFORMACIÓN GENERAL	1
2	INTRODUCCIÓN	2
2.1	SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	3
2.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
2.3	OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN	4
2.3.1	Objeto de Investigación:.....	4
2.3.2	Campo de acción:	4
2.4	BENEFICIARIOS.....	4
2.4.1	Directos:.....	4
2.4.2	Indirectos:.....	4
2.5	JUSTIFICACIÓN	4
2.6	OBJETIVOS	6
2.6.1	General.....	6
2.6.2	Específicos:.....	6
2.7	SISTEMA DE TAREAS	6
3	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	8
3.1	Antecedentes.....	8
3.2	Origen de la energía solar	9
3.3	Radiación del sol.....	9
3.4	El camino que sigue la radiación solar	11
3.4.1	Clasificación de la radiación.....	11
3.4.2	Radiación directa	12
3.4.3	Radiación difusa	12
3.4.4	Radiación reflejada.....	12
3.4.5	Radiación global.....	12

3.5	Horas de Sol Pico (H.S.P.)	12
3.6	¿Cómo aprovechar la energía solar?	13
3.6.1	Electricidad Solar	13
3.7	Paneles Fotovoltaicos.....	13
3.7.1	El módulo solar de tecnología monocristalina	15
3.7.2	El módulo fotovoltaico policristalino	15
3.8	El inversor.....	15
3.8.1	¿Cómo funciona un inversor CC-CA?.....	16
3.9	Fluke 435-II	16
3.9.1	Características Principales.....	17
3.9.2	Aplicaciones	18
3.10	PVsystem	18
3.10.1	Procedimiento de configuración de un proyecto fotovoltaico en PVsystem:	19
3.10.2	Análisis y simulaciones del sistema fotovoltaico mediante PVsystem	19
3.11	Red neuronal LSTM	20
3.11.1	La estructura de las LSTM	21
3.11.2	¿Para qué sirve el modelado predictivo con LSTM?.....	21
4	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	22
4.1	Modalidad de Investigación.....	22
4.2	Diagrama de flujos.....	23
4.3	Datos técnicos de partida	24
4.3.1	Ubicación del sitio de estudio.....	24
4.3.2	Levantamiento de carga.....	25
4.3.3	Diagrama unifilar de fuerza.....	25
4.3.4	Base de datos meteorológicos de irradiación solar.....	26
4.3.5	Temperatura promedio.....	27
4.4	Materiales y equipos del sistema fotovoltaico ON-GRID	28

4.4.1	Selección de materiales	28
4.4.2	Medidor Trifásico Elster 10(100) A 230/400V Bidireccional Directo	28
4.4.3	Modulo fotovoltaico	28
4.4.4	Inversor trifásico HUAWEI SUN2000-50KTL-M3 de 50 kW	29
4.4.5	Interruptor termomagnético Solar DC 63A -1000V	30
4.4.6	Protector contra sobretensiones SPD DC para paneles fotovoltaicos (1000 V DC)	30
4.4.7	Portafusibles fotovoltaicos solares CC 1000 V	30
4.4.8	Fusible Solar PV DC 20A (10X38)	30
4.4.9	Cable fotovoltaico 16 mm ²	31
4.4.10	Gabinete metálico pesado 60X40X20cm (Doble fondo)	31
4.4.11	Ls b-0168 Breaker caja moldeada 3P 100A	32
4.4.12	Cable de cobre desnudo 6 7H 600V	32
4.5	Modelos matemáticos para el cálculo técnico, energético y económico del proyecto.....	32
4.5.1	Potencia del Generador Fotovoltaico (kWp).....	33
4.5.2	Número de Paneles	33
4.5.3	Inversores.....	33
4.5.4	Calibre del conductor.....	34
4.5.5	Ecuación WACC.....	34
4.5.6	Valor Actual Neto (VAN).....	35
4.5.7	Tasa Interna de Retorno (TIR).....	35
4.5.8	Costo Nivelado de la Energía (LCOE).....	35
5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	36
5.1	Resultados del análisis de la demanda energética.....	36
5.2	Análisis del costo de consumo energético del sistema de bombeo mediante el pliego tarifario vigente del año 2025.	36
5.3	Simulación en PVsyst para el sistema fotovoltaico	38

5.4	Dimensionamiento fotovoltaico.....	39
5.5	Cálculo del calibre del conductor	40
5.6	Cálculo de las protecciones en DC	41
5.7	Estimación de la energía generada por el sistema fotovoltaico	41
5.8	Elección del inverso	42
5.9	Resultados del análisis de la irradiación solar	42
5.9.1	Datos de la irradiación solar	42
5.9.2	Análisis y pronóstico de la irradiación solar	43
5.10	Resultados del análisis de la generación por el sistema fotovoltaico	45
5.11	Análisis económico.....	46
5.11.1	WACC.....	47
5.11.2	Costo de inversión inicial (CAPEX) del sistema fotovoltaico	48
5.11.3	Costos de operación y mantenimiento (OPEX).....	49
5.11.4	Determinación del costo nivelado de energía LCOE	50
5.11.5	La Tasa Interna de Retorno (TIR).....	50
5.11.6	Cálculo de Valor Actual Neto (VAN)	51
5.11.7	Periodo de recuperación el proyecto	52
5.12	Costos de comparación de sistema fotovoltaico	53
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
6.1	Conclusiones	54
6.2	Recomendaciones	55
7	REFERENCIAS	57
8	ANEXOS.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de distribución de la radiación solar.	10
Figura 2. Global solar atlas.....	11
Figura 3. Valores referenciales de Aire-Masa en función de la elevación solar.	11
Figura 4. Concepto de Horas Sol Pico.....	13
Figura 5. Panel Fotovoltaico.....	14
Figura 6. Analizador de calidad de energía trifásico Fluke 435-II.	17
Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología aplicada para el diseño y evaluación técnico-económico del sistema fotovoltaico híbrido propuesto.	23
Figura 8. Ubicación Geográfica.....	25
Figura 9. Diagrama unifilar del conjunto de bombas.	26
Figura 10. Datos históricos de irradiación solar.	27
Figura 11. Temperatura promedio.	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de tareas en relación a los objetivos.	6
Tabla 2. Datos de la carga conectada.....	25
Tabla 3. Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico JA Solar JAM78S30-585/MR	29
Tabla 4. Especificaciones técnicas del inversor fotovoltaico.	29
Tabla 5. Protector contra sobretensiones SPD DC para paneles fotovoltaicos (1000 V).	30
Tabla 6. Especificaciones técnicas del fusible solar DC.....	30
Tabla 7. Especificaciones técnicas del conductor eléctrico.	31
Tabla 8. Pliego Tarifario sin demanda.	37
Tabla 9: Pliego Tarifario con demanda.	37
Tabla 10. Características del conjunto fotovoltaico.....	38
Tabla 11. Cálculo de los paneles solares.....	39
Tabla 12. Dimensionamiento de conductor para el FV.....	40
Tabla 13. Dimensionamiento de conductor al inversor hacia el tablero AC.	40
Tabla 14. Cálculo de tensión y corriente del FV de 4 string.....	41
Tabla 15. Energía generada por el sistema fotovoltaico.	42
Tabla 16. Cálculo de la potencia del inversor.	42
Tabla 18. Datos históricos de la irradiación solar de la ubicación del sitio estudiado. ..	43
Tabla 19. Pronóstico de la irradiación solar.....	44
Tabla 20. Energía consumida.....	45
Tabla 21. Energía AC generada.	45
Tabla 22. Deducción del costo medio ponderado del capital.	47
Tabla 23. Costo de inversión inicial del proyecto.	48
Tabla 24. Costos de operación y mantenimiento del proyecto.	49
Tabla 25: Calculo del VAN como usuario de medio voltaje de bombeo de agua - comunidades campesinas.....	51
Tabla 26. Cálculo de VAN como usuario de medio voltaje de bombeo agua con demanda	51
Tabla 27: Periodo de recuperación del proyecto como usuario de medio voltaje de bombeo de agua - comunidades campesinas de escasos recursos económicos sin fines de lucro.	52

Tabla 28: Periodo de recuperación del proyecto como usuario de medio voltaje de bombeo de agua con demanda.....	52
Tabla 29. Costos de comparación.	53

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1).....	33
Ecuación (2).....	33
Ecuación (3).....	34
Ecuación (4).....	34
Ecuación (5).....	34
Ecuación (6).....	35
Ecuación (7).....	35
Ecuación (8).....	35

1 INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Diseño de un sistema híbrido de alimentación energética para optimizar el funcionamiento y la eficiencia de un conjunto de bombas, garantizando un suministro confiable.

Modalidad de Titulación:

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

Trabajo de titulación vinculado al proyecto:

Estrategias de planeación de sistemas eléctricos en el contexto de la transición energética.

Equipo de trabajo de Titulación:

Estudiantes:

Coray Taco José Alfredo

Oña Aimacaña Juan Daniel

Tutor: Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza, Mgtr.

Área de Conocimiento:

07 Ingeniería, Industrias y Construcción	071 Ingeniería y Profesionales Afines	0713 Electricidad y Energía.
--	---------------------------------------	------------------------------

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublínea de investigación de la carrera:

Diseño, construcción y explotación eficiente de sistemas eléctricos con energía convencional y alternativa.

2 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la carga demandada de energía eléctrica ha mostrado un incremento constante durante los últimos años. Paralelamente, se ha incrementado el interés en incorporar fuentes con energías limpias, motivado por la necesidad de disminuir los impactos ambientales asociados a la generación convencional. Entre las alternativas renovables, la energía solar fotovoltaica sobresale por su amplia disponibilidad y relativa facilidad de implementación. Sin embargo, la naturaleza variable de este recurso constituye un reto para asegurar un suministro eléctrico estable en aplicaciones que requieran funcionamiento continuo, como los sistemas de bombeo de agua [1].

Los sistemas eléctricos que integran fuentes energéticas renovables tales como la solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica, han adquirido creciente relevancia como alternativa para disminuir la dependencia de la red eléctrica convencional. La combinación de distintas fuentes renovables dentro de un mismo sistema permite mejorar la estabilidad operativa, elevar la calidad de la energía suministrada y obtener una producción más constante a partir de los recursos disponibles. Asimismo, estos sistemas favorecen un aprovechamiento más eficiente de las fuentes energéticas locales [2].

En zonas rurales y áreas de actividad productiva, el suministro de agua depende en gran medida del desempeño adecuado de sistemas de bombeo eléctrico. En el sector de Chan Chico, la energía requerida para el funcionamiento de estos equipos se adquiere a partir de la red eléctrica convencional, la cual puede presentar fluctuaciones o interrupciones que comprometen la continuidad del servicio. Ante este escenario el principal propósito

de este estudio investigativo consiste en diseñar un sistema híbrido que combine la red de suministro eléctrico con generación solar fotovoltaica con la finalidad de optimizar la eficiencia y garantizar el funcionamiento confiable del sistema.

Para alcanzar este estudio se abordará la caracterización de la demanda eléctrica, el análisis de la irradiación solar, el diseño de los componentes para del sistema híbrido así mismo la evaluación de desempeño energético y financiero con el uso de herramientas especializadas como PVsyst [3].

La metodología que se va utilizar implica en la recopilación de datos reales de operación del sistema de bombeo, información históricos meteorológicos de la irradiación del sitio, el entrenamiento y validación del modelo LSTM Seq2Seq para generar predicciones a largo plazo, el diseño del sistema fotovoltaico y su integración a la red eléctrica y como punto final el estudio económico del dicho sistema. Esta metodología permitirá diagnosticar la viabilidad técnica y económica de la propuesta [4].

2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En el sector de Chan Chico, el sistema de bombeo responsable del abastecimiento de agua funciona únicamente con energía proveniente de la red eléctrica convencional. Esta situación genera una alta dependencia del servicio eléctrico, lo que expone al sistema a interrupciones por fallas en la red, variaciones de voltaje o problemas en la infraestructura de distribución. Como consecuencia, se producen detenciones imprevistas en la operación de las bombas, originando irregularidades en el suministro de agua a la comunidad.

En la actualidad, las comunidades que dependen de estos sistemas enfrentan problemas relacionados con la intermitencia en el suministro del líquido vital, lo que incide directamente el bienestar y las condiciones de vida de la población.

Por otro lado, la zona dispone de importante potencial solar, no se cuenta con estudios técnicos que permitan estimar el comportamiento futuro de la demanda energética del sistema de bombeo ni del recurso solar disponible. Esta falta de información limita la planificación de alternativas energéticas adecuadas y genera incertidumbre en la toma de decisiones respecto a posibles mejoras en el sistema.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿En qué medida favorece la evaluación de indicadores de factibilidad de un sistema solar fotovoltaico híbrido para la operación del sistema de bombeo de agua en el sector Chan Chico considerando la disponibilidad futura del recurso solar?

2.3 OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto de Investigación:

Sistema fotovoltaico y la red eléctrica.

2.3.2 Campo de acción:

Para este se tomará en cuenta algunas asignaturas: 3306 Ingeniería y Tecnologías Eléctricas, 2106.01 Energía Solar y 3322.05 Fuentes no Convencionales de Energía.

2.4 BENEFICIARIOS

2.4.1 Directos:

Comunidad del sector Chan Chico, conformado por las familias que dependen del sistema de bombeo para el abastecimiento de agua potable.

2.4.2 Indirectos:

Sector productivo local (agricultura y ganadería), por acceso a un suministro de agua estable para actividades económicas.

2.5 JUSTIFICACIÓN

El suministro sostenido de agua limpia es un servicio vital para el bienestar de las comunidades rurales. En el caso del sector Chan Chico, el mecanismo de bombeo funciona conectado a la red de distribución normalizada de energía eléctrica, lo que vuelve vulnerable su continuidad de funcionamiento en caso de detención de la red y afecta a la regularidad en la distribución del recurso hídrico. La anterior situación demuestra la importancia del análisis de fuentes alternativas de energía para incrementar la confiabilidad del sistema.

En términos técnicos, este trabajo es justificado por la ausencia de estudios locales que combinan un análisis de la demanda energética del sistema de bombeo con la evaluación del recurso solar. Por lo tanto, al diseñar un sistema fotovoltaico híbrido conectado en la

red, complementando con modelos de pronósticos y consumos energéticos dará la oportunidad de establecer criterios para planificar soluciones energéticas sostenibles en áreas rurales.

Además, desde el punto de vista energético y ambiental, la incorporación de un sistema solar fotovoltaico híbrido representa una alternativa que contribuye a la diversificación de la matriz energética local, reduciendo la dependencia exclusiva de la red convencional. La utilización del recurso solar disponible en la zona permite aprovechar una fuente renovable abundante, lo que no solo fortalece la seguridad energética del sistema de bombeo, sino que también disminuye la exposición a variaciones tarifarias y posibles incrementos en los costos del suministro eléctrico.

En el ámbito económico, la evaluación de indicadores de factibilidad como el valor actual neto, la tasa interna de retorno y el costo nivelado de energía permitirá determinar de manera objetiva la viabilidad financiera del proyecto. Estos indicadores proporcionan herramientas cuantitativas para sustentar la toma de decisiones, garantizando que la propuesta no solo resulte técnicamente factible, sino también económicamente viable a lo largo de su vida útil.

Por otra parte, el empleo de modelos de pronóstico para estimar la disponibilidad futura del recurso solar y el comportamiento de la demanda energética aporta un enfoque prospectivo al estudio, permitiendo anticipar escenarios de operación y optimizar el dimensionamiento del sistema. Este análisis reduce la incertidumbre asociada a la variabilidad climática y fortalece la planificación energética del sector.

Finalmente, la presente investigación adquiere relevancia social al proponer una solución orientada a mejorar la continuidad del abastecimiento de agua en el sector Chan Chico, aportando al bienestar comunitario y al desarrollo sostenible social. De esta manera, el estudio no solo responde a una necesidad técnica, sino que también aporta fundamentos para futuras intervenciones energéticas en contextos rurales similares.

Además, este estudio también se justifica porque parte de una realidad concreta del sector Chan Chico. No se trata únicamente de plantear una solución teórica, sino de analizar datos reales obtenidos directamente del sistema de bombeo mediante mediciones en campo. Esto permite comprender cómo funciona actualmente el sistema, cuáles son sus limitaciones y qué tan viable es incorporar una alternativa energética como la solar. Al basarse en información medida y no en supuestos, la propuesta adquiere mayor solidez y

credibilidad de esta manera, el proyecto busca ofrecer una solución práctica, fundamentada en evidencia, que pueda responder de forma realista a las necesidades energéticas y sociales de la comunidad.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 General

Evaluar los indicadores de factibilidad de un sistema solar fotovoltaico híbrido para la operación del sistema de bombeo de agua en el sector Chan Chico considerando la disponibilidad futura del recurso solar.

2.6.2 Específicos:

- Realizar el estado del arte sobre indicadores de factibilidad de un sistema solar fotovoltaico híbrido mediante búsqueda bibliográfica para la operación del sistema de bombeo de agua.
- Diseñar el sistema solar fotovoltaico híbrido para bombeo de agua mediante la irradiación solar y la potencia de bombeo de agua para abastecer un suministro de energía confiable, eficiente y económicamente viable.
- Evaluar los indicadores de factibilidad de un sistema solar fotovoltaico híbrido para la operación del sistema de bombeo de agua en el sector Chan Chico considerando la disponibilidad futura del recurso solar.

2.7 SISTEMA DE TAREAS

En la Tabla 1 se puede apreciar las actividades que se van a realizar de acuerdo a los objetivos específicos planteado de acuerdo con el tema del proyecto.

Tabla 1. Sistema de tareas en relación a los objetivos.

Objetivo Específico	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar el estado del arte sobre indicadores de factibilidad de un sistema solar fotovoltaico híbrido	Búsqueda bibliográfica en artículos científicos, normas técnicas y tesis relacionadas	Base teórica y conceptual que sustente el análisis de los indicadores de factibilidad técnica y económica de sistemas	Revisión documental. Bases de datos científicas (páginas

mediante búsqueda bibliográfica para la operación del sistema de bombeo de agua.	con sistemas fotovoltaicos híbridos.	solares fotovoltaicos híbridos aplicados a sistemas de bombeo de agua.	webs, IEEE, Google Académico).
	Análisis de indicadores de factibilidad técnica y económica aplicados a sistemas energéticos.	Identificación de indicadores técnicos y económicos relevantes para la evaluación del sistema.	
Diseñar el sistema solar fotovoltaico híbrido para bombeo de agua mediante la irradiación solar y la potencia de bombeo de agua para abastecer un suministro de energía confiable, eficiente y económicamente viable.	Medición del consumo eléctrico del sistema de bombeo mediante analizador de energía.	Datos de demanda energética del sistema de bombeo.	Analizador de energía FLUKE 435-II, software (PVsyst, PVGIS).
	Análisis de datos de irradiación solar del sitio de estudio, dimensionamiento del sistema fotovoltaico híbrido.	Configuración técnica del sistema fotovoltaico híbrido.	
Evaluar los indicadores de factibilidad de un sistema solar fotovoltaico híbrido para la operación del sistema de bombeo de agua en el sector Chan Chico considerando la disponibilidad futura del recurso solar.	Pronóstico de la disponibilidad futura del recurso solar.	Indicadores de factibilidad técnica y económica del sistema propuesto.	Modelos de predicción del recurso solar, herramientas de análisis económico (Excel).
	Cálculo de indicadores de factibilidad económica.	Determinación de la viabilidad del sistema fotovoltaico híbrido en el sector Chan Chico.	

Responsable: El investigador

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Antecedentes

Si se tiene dos o más sistemas de generación de energía cuando se unen en una sola instalación para generar electricidad, se forma lo que se llama un sistema híbrido. Estos sistemas suelen estar compuestos por fuentes de energía renovables [5].

Actualmente, hay una gran demanda de energía eléctrica que sigue aumentando con el tiempo. Al mismo tiempo, los recursos fósiles más utilizados para su producción están disminuyendo de manera significativa. Esta situación es la razón principal del crecimiento en el uso de energías limpias, exclusivamente la eólica y la solar. Los paneles fotovoltaicos funcionan al transformar directamente la energía solar en energía eléctrica a través de celdas fotoeléctricas hechas de diferentes materiales semiconductores, especialmente el silicio [6].

Entre las principales ventajas de utilizar esta clase de energía son que no contaminan el medio ambiente, debido a que es renovable y limpia. También se reduce el costo de mantenimiento e instalación de las redes eléctricas, en especial en zonas que son de difícil acceso y aisladas. Además, hay un bajo riesgo de falla y un costo bajo de mantenimiento [6].

Para aprovechar la Energía Solar con sistemas fotovoltaicos, se debe considerar un sistema de control para usar la energía en un trabajo específico. Uno de los mejores modos de emplear la energía solar es para manipular motores y llevar a cabo tareas, como la extracción de agua [7].

Debido a los grandes beneficios del uso de los sistemas fotovoltaicos y su impacto económico a largo plazo, se ha elegido este sistema para un sistema de bombeo. El abastecimiento de agua es esencial para la supervivencia en un asentamiento rural, ya que, en muchos casos, el agua potable por ducto no llega a estos lugares. Por lo tanto, encontrar una forma de obtener este recurso se convierte en un problema. La mayoría de los usuarios prefieren la extracción manual, pero esta opción no es la más eficiente. Además, con el constante crecimiento del consumo de energía a lo largo de los años, es importante considerar las energías renovables como parte de la solución. Por estos motivos, se necesita un sistema fotovoltaico que pueda alimentar una bomba para la extracción de agua [7].

En las áreas rurales, además de las limitaciones en infraestructura, persiste una problemática importante relacionada con el acceso continuo al agua en los hogares. Para cubrir esta necesidad, es frecuente el uso de pozos y sistemas de bombeo, los cuales requieren energía eléctrica para su funcionamiento. El consumo energético de estas bombas varía según su potencia; por ejemplo, una bomba de $\frac{1}{2}$ HP consume aproximadamente 0.368 kWh, una de $\frac{3}{4}$ HP alrededor de 0.552 kWh y una de 1 HP cerca de 0.746 kWh. Este consumo se refleja mensualmente en costos económicos asociados al uso de generadores eléctricos y a la dependencia de combustibles fósiles [7].

Esta situación se agrava considerando que en el Ecuador una proporción significativa de la población rural vive en pobreza. Se estima alrededor del 35 % de la población pobre del país, una parte pertenece a zonas rurales, y que tres de cada cuatro habitantes de las áreas rurales de la región andina se encuentran por debajo de la línea de pobreza. Además, estas comunidades enfrentan aislamiento geográfico, limitaciones en el acceso a servicios básicos como educación, salud y vivienda. A ello se suma que, en ciertos sectores, la red eléctrica nacional no tiene cobertura total [7].

Ante este panorama, resulta necesario analizar alternativas que permitan reducir los costos energéticos y mejorar el acceso a servicios básicos. En este contexto, la incorporación de sistemas de energías renovables, especialmente la tecnología fotovoltaica, se presenta en calidad de una solución técnica eficiente y sostenible para atender esta problemática [7].

3.2 Origen de la energía solar

La energía solar se llama así porque proviene del sol. Esta es una enorme esfera de gases a temperaturas elevadas, compuesta principalmente de carbono, helio e hidrógeno. Genera mucha energía a través de reacciones de fusión, donde hay una considerada pérdida de masa. Esta energía se manifiesta en la superficie terrestre como radiación solar. Su distribución varía según varios factores, como la distancia de la tierra al sol, la hora del día, la inclinación del globo terráqueo con respecto al sol y la región de la superficie terrestre, entre otros [6].

3.3 Radiación del sol

La radiación proveniente del sol corresponde a la energía que irradia y es emitida por el sol la cual se propaga hasta la tierra en ondas electromagnéticas con distintas longitudes

de onda. De manera general, puede entenderse como el flujo energético que el sol irradia continuamente hacia el espacio y que, al alcanzar nuestro planeta, constituye la fuente primaria de energía para múltiples procesos naturales y tecnológicos. Antes de llegar al territorio terrestre, está la radiación solar que atraviesa la atmósfera, en la cual experimenta eventos como la reflexión, la absorción junto con la dispersión. Estos procesos reducen parcialmente la intensidad de la radiación incidente, de modo que la cantidad de energía que finalmente alcanza el suelo depende de las condiciones atmosféricas y geográficas del lugar. Este comportamiento resulta fundamental para el análisis y aprovechamiento de la energía solar en aplicaciones fotovoltaicas [6].

La radiación solar que absorbe la atmósfera terrestre no se utiliza completamente. En términos generales, el 24% de la radiación llega directamente, el 21% no llega de forma directa y el 29% se pierde en el espacio [8].

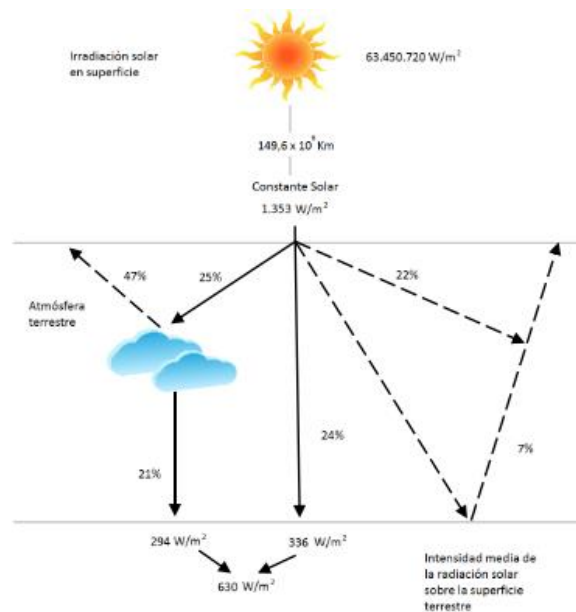


Figura 1. Modelo de distribución de la radiación solar [8].

Ecuador está dentro de los países de Sudamérica que tiene un alto potencial de radiación solar. Esto se debe a su ubicación geográfica en la línea ecuatorial. Esta condición permite que haya una disponibilidad bastante constante del recurso solar a lo largo del año. Esto representa una buena oportunidad para desarrollar proyectos de generación de energía fotovoltaica. Dentro de la región, Ecuador presenta niveles de irradiación competitivos, siendo superado principalmente por países como Chile, Perú y algunas zonas de Bolivia y Argentina con altos índices de radiación solar.

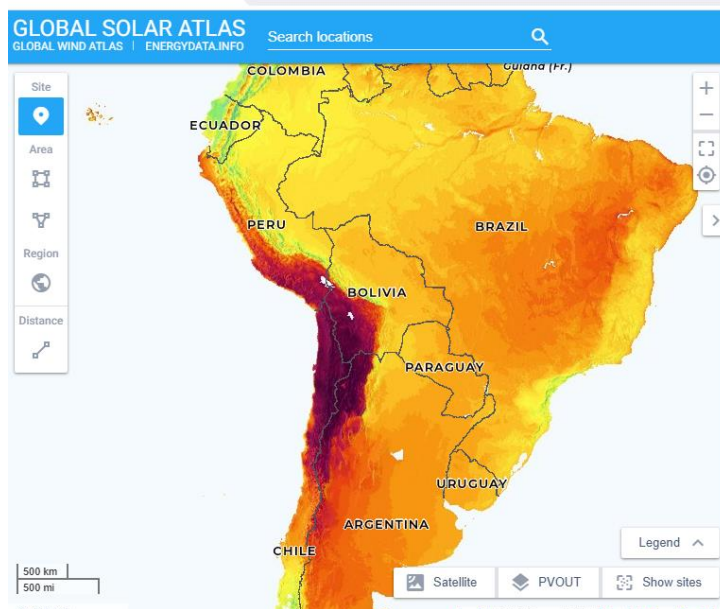


Figura 2. Global solar atlas [9].

3.4 El camino que sigue la radiación solar

Es claro que la radiación solar aumenta a medida que disminuye la distancia del sol. Esto ocurre cuando el sol se encuentra más próximo a la Tierra, o sea, $\alpha = 90^\circ$. Es necesario definir el concepto de masa de aire (AM); esta es una medida de la distancia que recorre la radiación al atravesar la atmósfera [8].

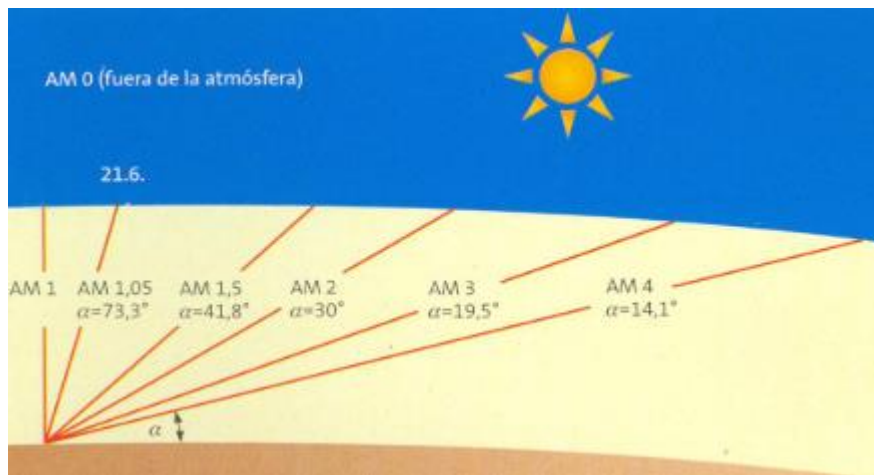


Figura 3. Valores referenciales de Aire-Masa en función de la elevación solar [8].

3.4.1 Clasificación de la radiación

Se pueden distinguir varios tipos de radiación según cómo las superficies la reciben. Son estas: directa, difusa y reflejada. Con la suma de estos tres puntos de la radiación global.

3.4.2 Radiación directa

Es la radiación que proviene directamente del sol sin alteraciones en su trayectoria. Es la más grande y relevante en las aplicaciones de energía solar.

3.4.3 Radiación difusa

Es la sección de la radiación que atraviesa la atmósfera y es absorbida y reflejada por las nubes, partículas de polvo suspendidas en el aire, moléculas de agua, estructuras arquitectónicas y la superficie terrestre. Las superficies horizontales son las que más absorben esta radiación, en tanto que las superficies verticales reciben una cantidad inferior.

3.4.4 Radiación reflejada

Llamado albedo, es la radiación difusa y directa que primero alcanza el terreno u otras superficies próximas. Estas superficies producen una reflexión para que la radiación pueda alcanzar a los captadores.

3.4.5 Radiación global

Es la adición de todas las radiaciones que se han mencionado antes. Se llama así porque es la radiación solar total que alcanza la superficie de un receptor. Por lo tanto, es fundamental conocerla y medirla.

3.5 Horas de Sol Pico (H.S.P.)

Las horas de sol pico son aquellas en las que se produce una irradiación hipotética de 1000 W/m^2 . Estas horas de sol aportan la misma cantidad de radiación que se registra en realidad en ese día.

Es posible ver que la irradiancia, cuando se expresa en kWh/m^2 , es numéricamente parecida a las H.S.P. Este concepto es relevante. Conjuntamente con un elemento de pérdida, contribuye a calcular la potencia generada por los paneles fotovoltaicos. La distribución de la radiación a lo largo del día y el concepto de horas pico de sol [8].

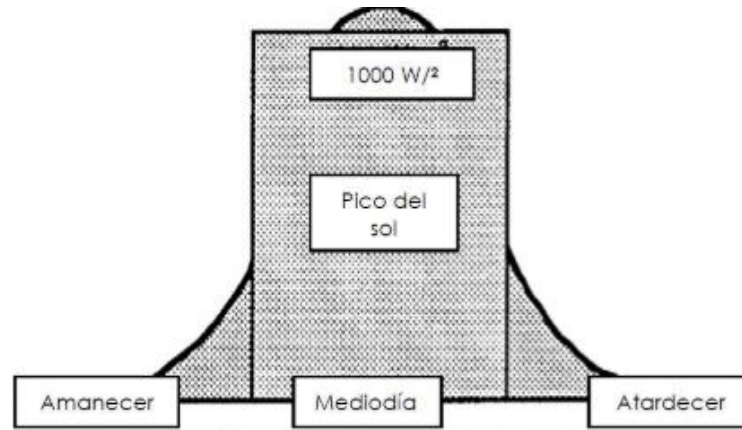


Figura 4. Concepto de Horas Sol Pico [8].

3.6 ¿Cómo aprovechar la energía solar?

Hoy en día, muchas personas, industrias y entidades públicas y privadas están buscando la manera de aprovechar al máximo la energía solar. Esta es una fuente inagotable de energía y menos contaminante que las fuentes tradicionales, como el petróleo, el carbón y el gas [10].

3.6.1 Electricidad Solar

Esta es una de las aplicaciones que más ha tomado protagonismo en estos últimos años. Debido a que los paneles solares año tras año van reduciéndose en costo y además las personas se van dando cuenta de los beneficios económicos y ambientales de la energía solar, la electricidad solar se ha hecho más accesible. Un sistema solar generalmente es instalado en los techos de hogares o edificios para compensar el uso de energía del propietario, incluso en otros países el excedente se puede enviar a la red y cobrar, pero en el Perú eso aún no está permitido [10].

3.7 Paneles Fotovoltaicos

Un panel fotovoltaico (PV), comúnmente llamado panel solar, incorpora células PV que captan la luz del sol y transforman la energía proveniente del sol en electricidad. Estas células están hechas de un semiconductor que es capaz de transmitir energía, por ejemplo, el silicio. Se encadenan para crear un módulo [11].

Los electrones que constituyen la base de la electricidad se sueltan de su posición cuando el semiconductor de los paneles fotovoltaicos recoge la luz solar y empieza a circular por el semiconductor. Estos electrones liberados, todos con carga negativa, se desplazan a lo

largo de la célula hasta llegar a la superficie frontal. Esto crea un desequilibrio de carga entre la parte delantera y la trasera [11].

Los paneles solares fotovoltaicos constituyen un componente del sistema solar fotovoltaico. Su tarea es producir electricidad usando el principio fotoeléctrico. Estos paneles requieren otros dispositivos para ofrecer el servicio planeado, ya sea generando electricidad de manera autónoma o a través de una red. Los paneles solares fotovoltaicos, también conocidos como módulos solares fotovoltaicos, se componen de un grupo de células fotovoltaicas que generan electricidad a partir de la radiación solar que reciben. Se agrupan de acuerdo a su habilidad para generar. La potencia pico es el parámetro que se estandariza para esta clasificación. Esta potencia representa la máxima que un panel solar puede proporcionar en condiciones estándar, las cuales son: STC [12].

- Radiación de 1000 W/m²
- Masa del aire 1,5
- La temperatura de la célula o del módulo fotovoltaico fijada en 25 °C, se refiere a la temperatura operativa de la célula.
- La STC se refiere a la radiación y el espectro de la luz solar que incide en una superficie solar, que está inclinada hacia el sol a 41, 81° sobre la horizontal, en un día despejado.

La energía que produce una hora de sol bastaría para satisfacer las necesidades energéticas humanas durante todo un año. Esta declaración no es desmesurada. Mejor que cualquier gráfico, aclara la relevancia de que las personas puedan transformar en energía eléctrica aquello que el sol nos brinda. La energía solar es una alternativa futura para la humanidad, especialmente a través de la eficiencia de los paneles solares [13].



Figura 5. Panel Fotovoltaico [12].

3.7.1 El módulo solar de tecnología monocristalina

Compuesto por células de un solo cristal de silicio, los paneles solares monocristalinos tienen una eficiencia superior y rinden más que los paneles solares policristalinos. Esto significa que generan aún más energía teniendo la misma exposición de luz solar. Además, los módulos solares monocristalinos son más duraderos y son más resistentes en la presencia de viento y sombra. Por lo tanto, necesitan solo un poco de mantenimiento a largo plazo. Un panel monocristalino también tiene menos posibilidades de deteriorarse a lo largo del tiempo, lo que lo distingue del módulo solar policristalino. Hoy en día, gracias a los avances tecnológicos, podemos hallar paneles solares monocristalinos PERC [14].

Estos paneles tienen las mayores tasas de eficiencia de conversión fotovoltaica. Esto les permite obtener un rendimiento superior en comparación con otras tecnologías. Su capacidad para convertir la mayor cantidad de energía solar en eléctrica es notable. Su eficiencia al convertir luz solar en electricidad es del $25,6 \% \pm 0,5 \%$ [15].

3.7.2 El módulo fotovoltaico policristalino

Está compuesto por células que contienen múltiples partículas de silicio cristalizado. La diferencia y el beneficio principal del panel solar policristalino con respecto al monocristalino es el costo. El panel solar policristalino es más económico que el monocristalino. Por ende, cuando el presupuesto es un elemento fundamental para decidir entre un panel solar monocristalino o policristalino, el panel policristalino es la alternativa más asequible [14].

El silicio es el principal material para fabricar paneles policristalinos. Gracias a este material, se logran eficiencias de hasta $20,8\% \pm 0,5\%$ [15].

3.8 El inversor

Un inversor CC-CA transforma la corriente continua (CC) de paneles solares o baterías en corriente alterna (CA). Numerosos aparatos, como los electrodomésticos y los electrónicos, utilizan corriente alterna, que es el tipo de electricidad que se emplea comúnmente en empresas y viviendas. Un inversor CC-CA es imprescindible cuando se requiere el uso de dispositivos de CA en contexto móviles como caravanas, barcos o camiones [16].

3.8.1 ¿Cómo funciona un inversor CC-CA?

La operación de un inversor de corriente continua a corriente alterna comprende diversas etapas técnicas.

El inversor: El inversor toma la corriente continua de una batería o de los paneles solares, y, mediante el circuito inversor, transforma la corriente continua en corriente alterna.

Transformador: La corriente alterna pasa por un transformador para transformar la tensión. Por ejemplo, el inversor transforma 12V CC en 230 V CA monofásica. Así, el sistema se hace compatible con los dispositivos eléctricos convencionales.

Filtros y estabilización: Se aplican filtros y otras técnicas de estabilización en el transformador para devolver al usuario la corriente alterna de una manera estable y limpia. Los inversores de CC-CA de calidad como los inversores de onda sinusoidal pura, devuelven al usuario una salida más suave y estable. La suavidad de la salida es de especial interés para la electrónica sensible. Hablar de una salida estable representa la necesidad de asegurar que la tensión de CA se mantenga en el nivel deseado, en especial ante la existencia de una tensión de batería variables.

Salida: En su salida el inversor proporciona corriente alterna a los consumidores conectados, por ejemplo, frigoríficos, luces y otros aparatos eléctricos. Los compresores, ya sean independientes o los que se encuentran integrados en equipos de acondicionamiento de aire / refrigeración, son una carga complicada para muchos inversores. Por su propia naturaleza, pueden acumular energía internamente y devolverla al inversor, por lo que su circuito de salida debe estar adecuadamente diseñado para soportar este contragolpe, entre otras cuestiones [16].

3.9 Fluke 435-II

El fluke 435-II es un analizador de redes ofreciendo un conjunto potente y completo de mediciones. Existen algunos modelos que brindan una visión general del rendimiento del sistema de alimentación eléctrica. Otros se emplean para investigar detalles específicos [17].



Figura 6. Analizador de calidad de energía trifásico Fluke 435-II [18].

Tales dispositivos se han diseñado para ayudar a disminuir el tiempo perdido, para identificar de manera rápida la solución a los problemas de calidad de la electricidad, para calcular los costes derivados de la pérdida de energía. Un tiempo perdido es un coste a asumir, razón por la cual conviene disponer de los datos que permiten dar solución rápida a los problemas críticos de calidad eléctrica [18].

Se miden a la vez varios parámetros y se presentan en formatos que describen rápidamente el estado general de la calidad eléctrica. La información más concreta permite tomar decisiones de mantenimiento más ventajosas sea para disminuir la pérdida de energía sea para asociar la causa del problema de calidad eléctrica. También puede determinar cómo afecta al sistema eléctrico el arranque de motores. Se puede tener acceso a datos tales como valores digitales simples, gráficos de tendencias que muestran el comportamiento en el tiempo, formas de onda o diagramas fasoriales. Igualmente, los datos pueden ser analizados en formato de tabla. La información concreta de los eventos permite observar las etiquetas de magnitud, duración y tiempo de las anomalías, de manera que puede asociar los problemas que vive en sus instalaciones de forma rápida [18].

3.9.1 Características Principales

Medición exacta: Este instrumento puede medir voltaje, corriente, potencia, armónicos y otras métricas clave de calidad de energía con precisión.

Registro y documentación de eventos del sistema: Permite almacenar de forma automática sucesos como variaciones, cortes y transitorios que influye en la calidad del suministro eléctrico.

VARIABLES REGISTRADAS: Este instrumento puede medir variables como voltaje línea-neutro y línea-línea, corriente eléctrica, energía activa, energía reactiva, potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia, frecuencia de línea, ángulo de fase, distorsión armónica en tensión y corriente, (TDH y TDF%), desbalance de voltaje, así como condiciones de sobretensión y subtensión, entre otros parámetros eléctricos.

Traslado de Datos: Este dispositivo puede transferir datos por USB o tarjeta SD también es compatible con el software Fluke Connect (Power Log) para una mejor gestión de datos [19].

3.9.2 Aplicaciones

Mantenimiento de instalaciones eléctricas, evaluación de eficiencia energética, distribución de carga de fases, estudios de variación de tensión, estudios armónicos, niveles de transientes, instalación de sistemas fotovoltaicos y mantenimiento preventivo en industrias que necesitan una operación eléctrica confiable y eficiente. Su uso es clave en ambientes industriales, comerciales y residenciales donde la calidad de la energía es vital para el funcionamiento seguro y efectivo de los equipos [19].

3.10 PVsyst

PVsyst es conocido en todo el mundo como uno de los programas más utilizados para el diseño de instalaciones fotovoltaicas. Se usa en el sector de las energías renovables, especialmente en energía solar. Su éxito se debe a que está completamente diseñado para facilitar la simulación y el estudio de sistemas fotovoltaicos, tanto en ingeniería como en enseñanza e investigación [3].

PVsyst es un software útil y apreciado en la industria fotovoltaica. A partir del análisis de datos meteorológicos, permite crear simulaciones, realizar análisis y seleccionar individualmente parámetros para los sistemas fotovoltaicos en 3D. Ayudando a evaluar la eficiencia y viabilidad de una instalación solar. Los parámetros que tiene en cuenta son latitud, longitud, temperatura del aire, radiación solar, precipitación y dirección del viento en el lugar donde se aporta la instalación [3].

Su exactitud en la medición hace que sea un software muy usado en la instalación de paneles fotovoltaicos. A veces, también se encuentra en proyectos de autoconsumo o bombeo. La exportación de metadatos de PVsyst también permite hacer estudios detallados de viabilidad económica y rendimiento futuro [3].

3.10.1 Procedimiento de configuración de un proyecto fotovoltaico en PVsyst:

Modelación del proyecto: Para esta etapa inicial se deben incorporar los datos básicos de identificación, tales como nombre, cliente y dirección.

Lugar de la localización: En este punto en la casilla “Site and Meteo”, donde incluye toda la información geográfica y meteorológica del sitio elegido. Con la experiencia, habrás definido parámetros previos para los “site”, es decir, para las coordenadas y sus características específicas. En esta parte debes agregar, de manera separada, los valores de radiación y temperatura.

Inversor fotovoltaico: Como parte fundamental debes elegir el tipo de módulos e inversores fotovoltaicos que usarás para definir la potencia de la instalación.

Disposición física y orientación óptima de los módulos fotovoltaicos: En esto debes considerar factores como la inclinación, la orientación, la sombra de los módulos y las temperaturas mínimas y máximas de operación de los modelos.

3.10.2 Análisis y simulaciones del sistema fotovoltaico mediante PVsyst

Con los resultados obtenidos del proyecto, PVsyst hace una simulación para comprobar cómo funciona la configuración. Esto ayuda a evaluar cómo funciona la configuración y si vale la pena la inversión. Si la información es correcta, el programa prepara un informe con los resultados, lleno de datos como:

Energía generada: especificando el rendimiento anual de la planta fotovoltaica.

Pérdidas energéticas: a partir de las cuales se puede definir nuevas configuraciones orientadas a optimizar y mejorar la eficiencia del sistema.

El PR (Performance Ratio): es un indicador que evalúa el desempeño del sistema mediante la comparación entre la energía realmente generada y la energía teórica bajo condiciones ideales. Cuanto mayor sea este índice, mayor será la eficiencia global del sistema.

Balance energético: Esto muestra cómo la energía se mueve a través del sistema, con detalles sobre la energía entrante, la energía creada y cualquier energía que se pierda y registre.

Índice de uso del sistema: Esto es un indicador que cuantifica la relación existente entre la energía generada y la potencia nominal instalada de la red.

PVsyst te permite sumergirte en el mundo de la energía solar, simulando y analizando sistemas fotovoltaicos como un profesional. Esta cosa está orientada a ingenieros, arquitectos e investigadores, pero también es una herramienta de aprendizaje práctica para cualquier persona que bucee en proyectos de ingeniería o energía solar PVsyst es un deber-tener para mantenerse al día con las tendencias de la ingeniería solar [3].

3.11 Red neuronal LSTM

Se crearon para abordar problemas de aprendizaje automático relacionados con datos secuenciales, también conocidos como datos que se organizan en secuencias que dependen unas de otras, como las marcas de tiempo, las predicciones meteorológicas y las secuencias de ADN, por nombrar algunas, también existen ciertas limitaciones asociadas a estas redes neuronales. En particular, estas limitaciones incluyen dos variaciones de un problema similar, conocidas como gradientes de explosión y gradientes de fuga. En términos sencillos, estos problemas provocan que los pesos o parámetros de una RNN se vuelvan inestables, lo que significa que el modelo ya no podrá aprender ni funcionar como estaba previsto [4].

Para combatir estos problemas, los informáticos Sepp Hochreiter y Jurgen Schmidhuber introdujeron en 1997 el aprendizaje automático a corto plazo a largo plazo (LSTM). Las LSTM son una iteración de las RNN que pueden utilizarse para aprender la dependencia del orden. Debido a la naturaleza secuencial de las RNN, las iteraciones iniciales de estas redes neuronales sufren un problema por el que la precisión de las predicciones para las que se crearon dichos modelos puede ser menos precisa con el tiempo, ya que el bucle de retroalimentación que está integrado en el modelo aumenta a medida que se añade más información al modelo. Esto se conoce como dependencia a largo plazo de la RNN, en la que una RNN sólo es capaz de hacer predicciones precisas basándose en datos actuales. Dicho esto, las LSTM están diseñadas para retener información durante largos periodos de tiempo sin volverse inestables [4].

3.11.1 La estructura de las LSTM

En términos generales, una LSTM estará compuesta por cuatro redes neuronales diferentes, así como por varios bloques de memoria distintos. Estos bloques de memoria se conocen como células y se utilizarán para crear una estructura en cadena. Más concretamente, la forma más básica de LSTM contiene una célula, una puerta de entrada y salida y una puerta de olvido. Hasta aquí, el flujo de información que entra y sale de una célula concreta estará controlado por estas tres compuertas, lo que permite a esta célula retener información durante largos periodos de tiempo, como su nombre indica. Gracias a estas propiedades, las LSTM pueden utilizarse para analizar y predecir datos secuenciales de duración incierta. Esto se consigue de acuerdo con un ciclo de cuatro ciclos [4].

3.11.2 ¿Para qué sirve el modelado predictivo con LSTM?

El modelado predictivo mediante LSTM se utiliza en múltiples aplicaciones donde se requiere analizar secuencias temporales o secuencias dependientes:

Predicción de series temporales: En finanzas (precios de acciones), meteorología (predicción climática) y energía (consumo futuro), las LSTM analizan datos históricos para predecir valores futuros, incluso con ruido o retrasos.

Procesamiento del lenguaje natural (PLN): En aplicaciones como traducción automática, análisis de sentimientos y generación de texto, las LSTM comprenden el contexto de frases enteras al considerar palabras pasadas y futuras [20].

Mantenimiento predictivo: En industrias, las LSTM analizan señales de sensores para predecir fallos en equipos antes de que ocurran, reduciendo costes y tiempos de inactividad [20].

4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

En esta investigación se desarrolla bajo un enfoque metodológico mixto, que integra diversas técnicas de estudio de carácter descriptivo, analítico, proyectivo, simulativa y evaluativo, con el propósito de diseñar y analizar los indicadores de factibilidad de un sistema híbrido de generación solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica, orientado a optimizar el funcionamiento y la eficiencia energética del sistema de bombeo de agua.

Con la aplicación de los métodos de investigación seleccionados permite estructurar y ejecutar de forma sistemática las tareas planteadas para el desarrollo del estudio, con la finalidad de evaluar el diseño propuesto y determinar, con base en criterios técnicos y económicos, la viabilidad del sistema fotovoltaico híbrido como alternativa energética sostenible para el sistema de bombeo de agua.

4.1 Modalidad de Investigación

La presente investigación se realiza con un enfoque mixto, con predominio cuantitativo. La parte cuantitativa se aplica en la medición del consumo eléctrico del sistema de bombas mediante una analizador de redes (FLUKE 435-II), búsqueda de datos sobre la irradiación solar (PVgis), en el cálculo de energía que es generado por el sistema fotovoltaico, en la proyección de la irradiación solar media modelos de predicción y en la evaluación económica-financiera del proyecto a través de indicadores como LCO, VAN y TIR.

También se emplea un enfoque cualitativo en la revisión de bibliografías, fichas de fabricantes y estudios relacionados con sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Esta investigación es de carácter aplicado, puesto que parte del análisis de una problemática energética real para proponer una solución técnica viable, consistente en el diseño de un sistema fotovoltaico ON-GRID que permita optimizar el consumo energético, mejorar la continuidad operativa y reducir los costos asociados al funcionamiento de un conjunto de bombas de agua trifásicas de 30 kW cada una.

4.2 Diagrama de flujos

En el proceso metodológico empleado en el desarrollo de la presente investigación se detalla en el diagrama de flujo presentado en la Figura 7.

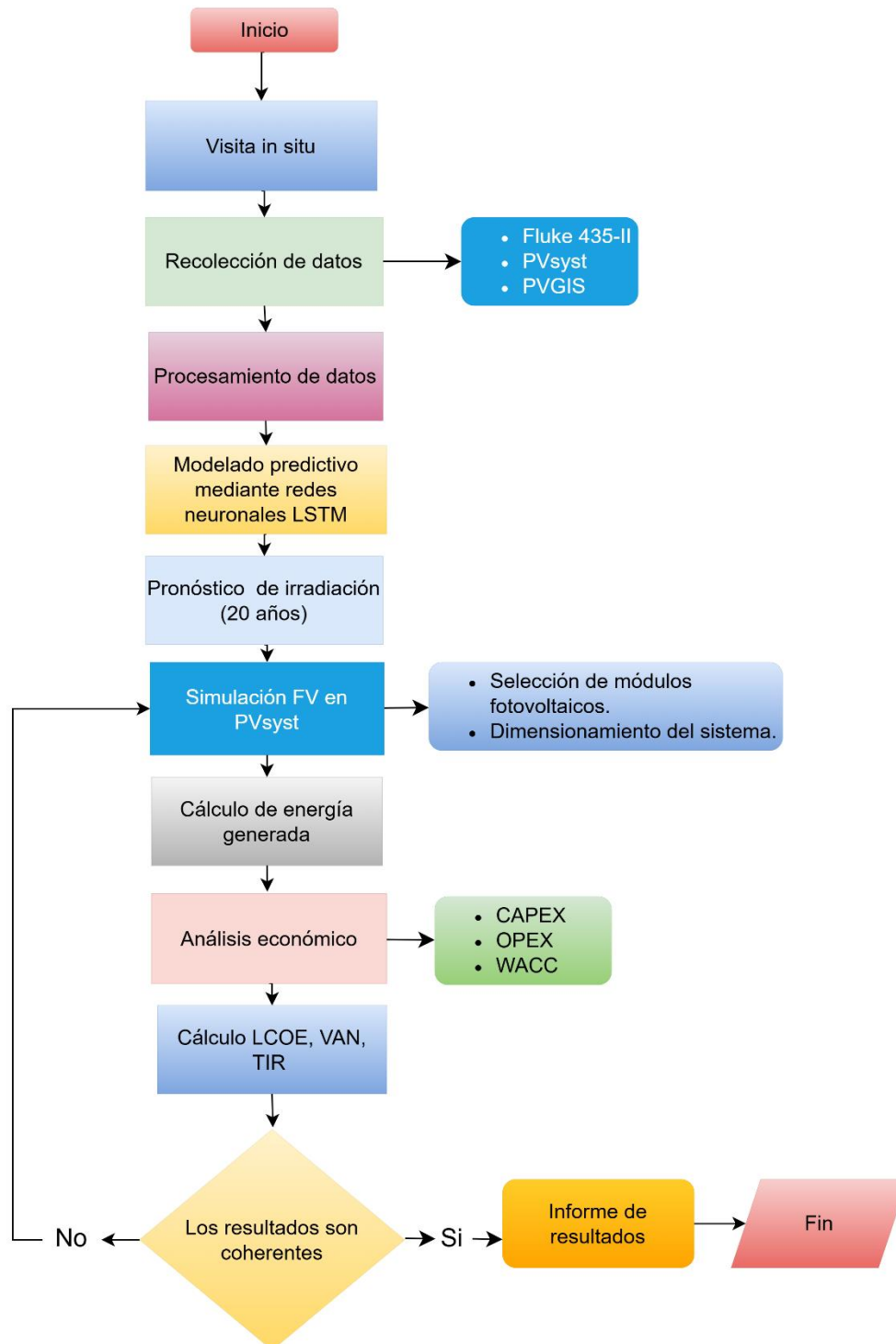


Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología aplicada para el diseño y evaluación técnico-económico del sistema fotovoltaico híbrido propuesto.

La Figura 7 corresponde al diagrama de flujo de la metodología que se aplicó en la investigación para el diseño y evaluación de un sistema fotovoltaico híbrido destinado a optimizar el funcionamiento de un conjunto de bombas de agua. El proceso inicia con la recolección de datos, donde se emplean instrumentos de medición eléctrica y herramientas de simulación como Fluke 435, PVsyst y PVGIS para obtener información de consumo energético y recurso solar del sitio de estudio. Posteriormente, los datos recopilados son sujetos a una etapa de procesamiento y análisis, que permite preparar la información necesaria para la aplicación del método de predicción basado en modelos de secuencia a secuencia.

A continuación, se desarrolla el pronóstico de irradiación solar con un horizonte temporal de 20 años, cuyos resultados sirven como entrada para la simulación fotovoltaica en PVsyst. En esta fase se realiza la selección de los módulos fotovoltaicos y el dimensionamiento del sistema. Luego, se calcula la energía eléctrica generada por la planta solar propuesta, información que alimenta el análisis económico del proyecto mediante la estimación de los costos de inversión, operación y la tasa de descuento correspondiente.

Con datos obtenidos de la predicción se determinan los indicadores financieros principales, tales como el costo nivelado de energía (LCOE), el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). Finalmente, los resultados obtenidos son evaluados para verificar su coherencia; en caso de ser satisfactorios, se elabora el informe de resultados y se concluye el estudio. Si los resultados no son coherentes, el proceso retorna a las etapas previas para realizar los ajustes necesarios.

4.3 Datos técnicos de partida

4.3.1 Ubicación del sitio de estudio

El sitio de estudio se ubica en el sector Eloy Alfaro (San Felipe), cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, Ecuador, en las coordenadas geográficas -0,978035 de latitud y -78,644923 de longitud.

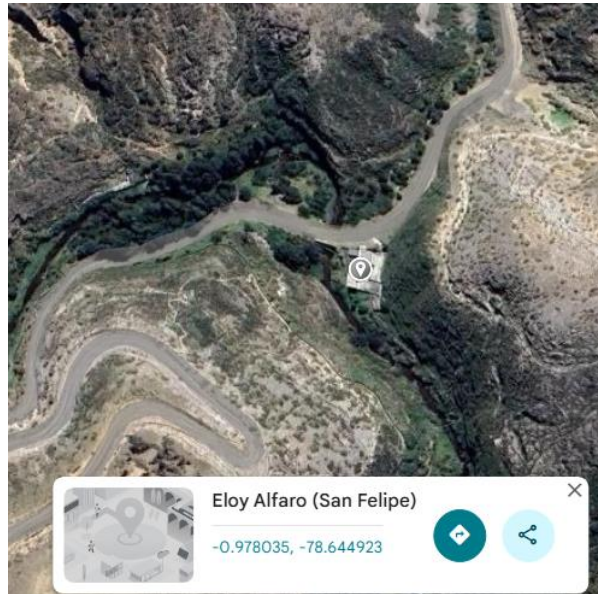


Figura 8. Ubicación Geográfica.

4.3.2 Levantamiento de carga

La energía activa total consumida por el sistema de bombeo durante el periodo de medición de 30 días fue obtenida a partir del registro acumulado del analizador de energía Fluke 435-II.

El valor inicial de energía activa total registrado al inicio de la medición fue de 6595 Wh, mientras que el valor final de medición fue de 2 934 830 Wh.

Por diferencia de los registros acumulados, se determinó que el consumo total del sistema durante los 30 días fue de 2934,83 kWh, lo que corresponde a un consumo promedio diario de 97,82 kWh/día.

Tabla 2. Datos de la carga conectada

Parámetro	Símbolo	Valor mínimo	Valor máximo	Unidad
Tensión fase-fase	V _{ph-ph}	217,8	228,4	V
Corriente de línea	I	69,3	86,2	A
Frecuencia	F	59,92	60,06	Hz
Potencia activa total	P	22,22	27,64	kW
Factor de potencia total	cos ϕ	0,85	0,93	—

4.3.3 Diagrama unifilar de fuerza

La Figura 9 presenta el diagrama unifilar de fuerza correspondiente al sistema de bombeo de agua trifásico, en el cual se aprecia la distribución de energía eléctrica desde la red pública a través del transformador trifásico de 45 kVA, el sistema de medición y

protección principal, hasta las tres bombas de agua de 220V y 40 HP cada una, con una potencia total instalada de 90 kW.

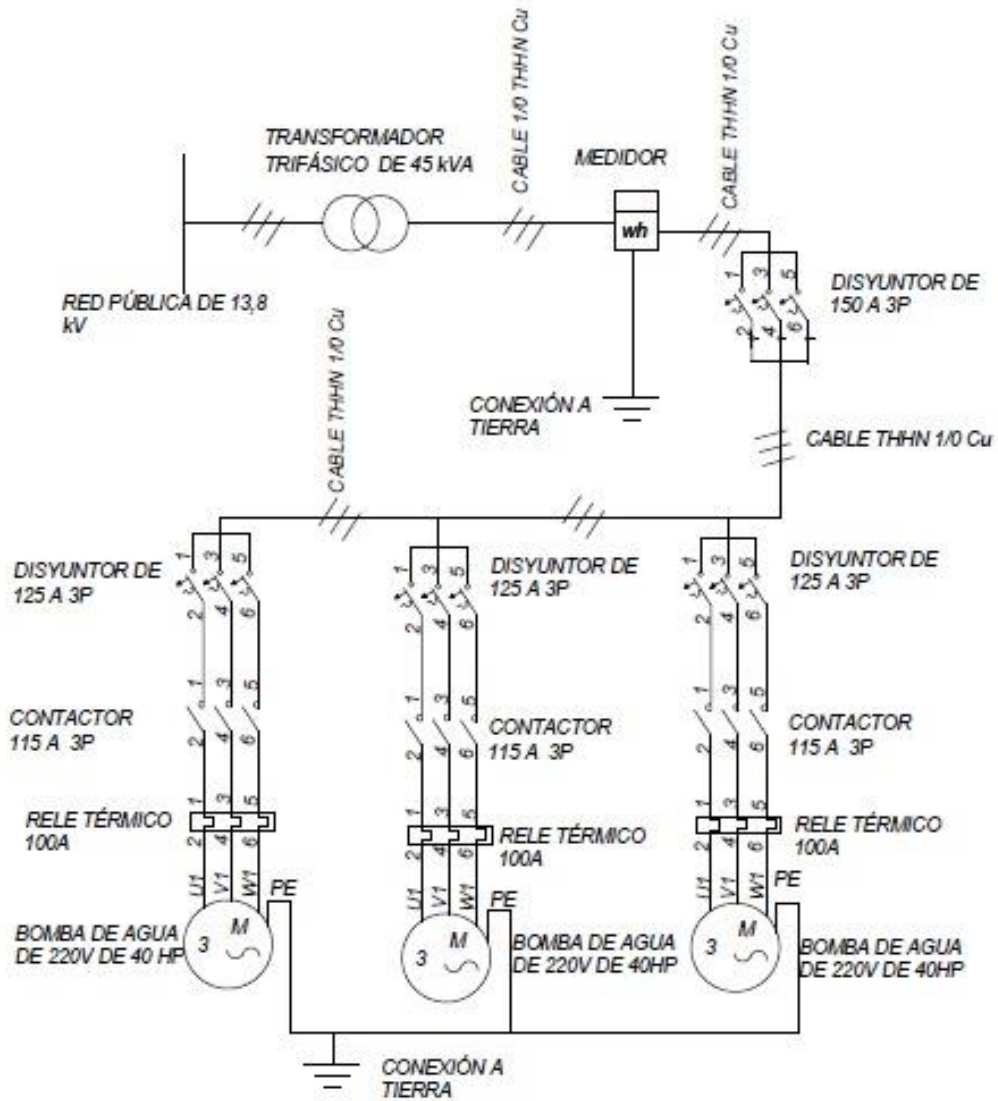


Figura 9. Diagrama unifilar del conjunto de bombas.

4.3.4 Base de datos meteorológicos de irradiación solar

Los datos históricos fueron extraídos de PVGIS-ERAS5, con la ubicación ya conocida, estos datos fueron extraídos de años pasados como datos históricos. En la siguiente Figura 10 conocerá los datos extraídos de irradiación.

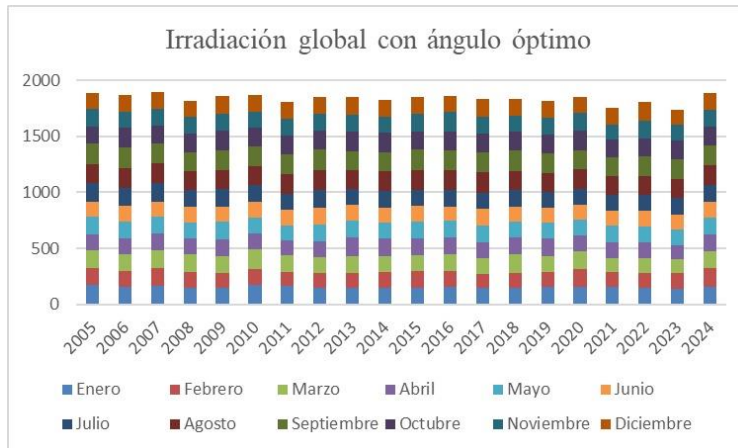


Figura 10. Datos históricos de irradiación solar.

En la Figura 10 presenta la irradiación global con ángulo óptimo registrado para el sitio del proyecto durante el periodo 2005-2024. En el gráfico muestra barras apiladas que muestran los valores mensuales de la irradiación solar expresados en kWh/m². año, donde permite visualizar la contribución de cada mes al total anual. Entonces se puede decir que la irradiación oscila a aproximadamente entre 1700 y 1900kWh/m². año. Los meses donde tiene mayor aporte energético corresponden generalmente agosto, septiembre y octubre, mientras que los valores más bajos son abril y mayo.

4.3.5 Temperatura promedio

Los datos históricos fueron extraídos de PVGIS-ERAS5, estos datos corresponden de años anteriores. En la siguiente Figura 11 se conocerá los datos extraídos de la temperatura media.

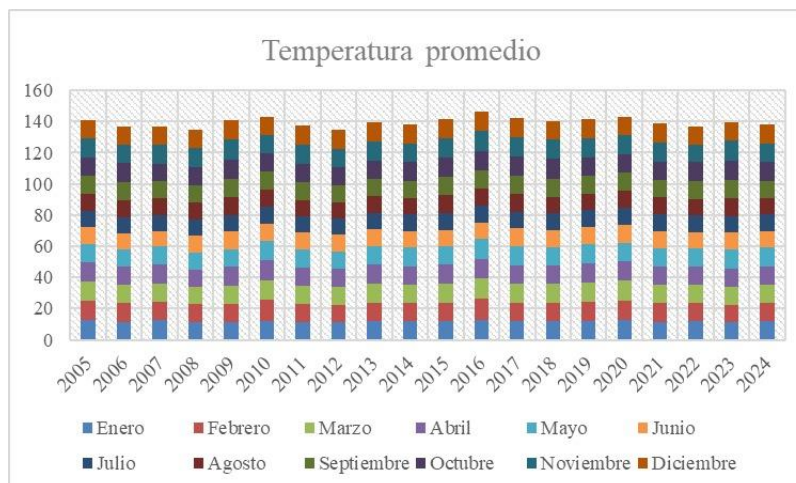


Figura 11. Temperatura promedio.

En la Figura 11 representa la temperatura promedio mensual desde enero a diciembre del año 2005 al 2024. Los valores mensuales individuales oscilan aproximadamente entre

10°C y 14°C. Los meses de marzo, abril y noviembre muestran temperaturas ligeramente superiores, mientras que los meses de julio y agosto registran valores algo más bajos. Este parámetro es fundamental para la evaluación del rendimiento del sistema fotovoltaico.

4.4 Materiales y equipos del sistema fotovoltaico ON-GRID

En la presente investigación, los materiales se definen como el conjunto de componentes, equipos y elementos técnicos necesarios para la implementación del sistema fotovoltaico conectado a la red, así como para la instrumentación y análisis del sistema de bombeo. Estos materiales incluyen tanto los dispositivos principales de generación, los elementos auxiliares de protección, medición y soporte estructural, los cuales permiten garantizar el funcionamiento seguro, eficiente y confiable del sistema.

La correcta selección de los materiales resulta fundamental, ya que influye directamente en el desempeño técnico del sistema, su vida útil, los costos de implementación y mantenimiento, así como en la compatibilidad entre los distintos componentes.

4.4.1 Selección de materiales

La etapa de selección de materiales corresponde al proceso mediante el cual se realiza la elección de los componentes directos e indirectos requeridos para la construcción del sistema fotovoltaico ON-GRID. En esta fase se consideran las características técnicas, eléctricas y operativas de cada material, así como su adecuación a las condiciones de funcionamiento del sistema de bombeo y a las condiciones ambientales del sitio de estudio.

4.4.2 Medidor Trifásico Elster 10(100) A 230/400V Bidireccional Directo

Medidor Elster Directo 10(100) A, 3x230/400 V, Con Verificación, Certificado SEC, AS3000, 8 tarifas de energía, 4 tarifas de demanda, Act. /React., Registro Bidireccional, Interfase RS485, 60Hz. Perfil de carga, Perfil de instrumentación, Registro de eventos, Constante Kc: 2000 imp/kWh/kVArh.

4.4.3 Modulo fotovoltaico

El JAM78S30-585/MR de JA Solar este tipo de panel es ampliamente utilizado en sistemas fotovoltaicos conectados a la red, sistemas híbridos y sistemas aislados, donde su función es captar la radiación solar y convertirla en energía eléctrica para abastecer cargas eléctricas o contribuir a la generación de energía renovable, es un panel solar con

una potencia nominal de salida de 585 W, un voltaje de salida de 44,56 V y una corriente de salida de 13,13 A. Este módulo está hecho para funcionar en un rango de temperatura de -40°C a 85 °C. La información se presenta con más detalle en la Tabla 3 [21].

Tabla 3. Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico JA Solar JAM78S30-585/MR

Modelo	JA Solar JAM78S30-585/MR
Potencia máxima (Pmax)	585 W
Eficiencia	20,9 %
Tensión máxima potencia (Vmp)	44,56 V
Corriente máxima potencia (Imp)	13,13 A
Tensión en circuito abierto (Voc)	53,2 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	13,88 A
Voltaje máximo del sistema	1500 V
Garantía de producto	12 años
Dimensiones	2465 × 1134 × 35 mm
Peso	30,5 kg

4.4.4 Inversor trifásico HUAWEI SUN2000-50KTL-M3 de 50 kW

Inversor trifásico Huawei SUN2000-50KTL-M3 de 50 kW convertirá la corriente continua generada de los paneles solares a corriente alterna (CA) permitiendo que esta energía pueda ser utilizada por equipos eléctricos, su función es adaptar la energía producida por el sistema fotovoltaico a las condiciones de tensión y frecuencia requeridas por la red y está diseñado para instalaciones solares de autoconsumo sin almacenamiento en baterías. Este equipo dispone de cuatro seguidores del punto de máxima potencia (MPPTs) con un amplio rango de voltaje de entrada: 200V ~ 1000V. Con una tensión máxima de entrada de 1100V. Dispone de 4 MPPTs con un total de 8 entradas de paneles solares [22].

Tabla 4. Especificaciones técnicas del inversor fotovoltaico.

Parámetro	Valor
Potencia nominal activa de CA	50.000 W
Máxima potencia aparente de CA	55.000 VA
Máxima tensión de entrada (Vmax)	1.100 V
Máxima intensidad por MPPT	48 A
Máxima intensidad de cortocircuito por MPPT	66 A
Tensión mínima de entrada	200 V
Rango de voltaje en MPPT	200 – 1000 V
Voltaje nominal de máxima potencia	600 V
Número máximo de entradas	8
Número de MPPTs	4

4.4.5 Interruptor termomagnético Solar DC 63A -1000V

El interruptor termomagnético solar protege de sobrecarga, sobretensión y cortocircuito en sistemas fotovoltaicos, con un rango de operación que va de 6 A a 63 A que le permite adaptarse a múltiples configuraciones de arreglos solares y necesidades de potencia. Su clasificación de corriente continua, de hasta 1000 V DC le permite ubicarse en instalaciones de generación solar y otras energías renovables [23].

4.4.6 Protector contra sobretensiones SPD DC para paneles fotovoltaicos (1000 V DC)

Para proteger el inversor y los equipos de posibles descargas atmosféricas, es esencial contar con un protector contra sobretensiones en una instalación solar [24].

Tabla 5. Protector contra sobretensiones SPD DC para paneles fotovoltaicos (1000 V).

Número de modelo	PV DC BUD-40/3
Número de polos	3P
Norma	EN 50539-11
Categoría IEC/EN	IEC II / EN2
Voltaje en circuito abierto	1000 V DC
Tensión operativa continua máxima	1000 V DC
Corriente de descarga nominal	20 kA
Corriente de descarga máxima	40 kA
Nivel de protección de voltaje	< 3.8 Kv
Tiempo de respuesta	< 25 ns
Rango de humedad	30 % – 90 %
Peso	0.36 kg

4.4.7 Portafusibles fotovoltaicos solares CC 1000 V

Diseñado para portafusibles maxi, facilitando la instalación y mantenimiento en paneles solares, capacidad de interrupción elevada para manejar cargas de energía solar PV de hasta 1000 V DC, cumple con los estándares de seguridad IEC, asegurando un uso confiable y seguro en sistemas de energía solar [25].

4.4.8 Fusible Solar PV DC 20A (10X38)

En la siguiente tabla se puede observar los datos técnicos del fusible [26].

Tabla 6. Especificaciones técnicas del fusible solar DC.

Parámetro	Valor
Tipo de dispositivo	Fusible solar fotovoltaico DC

Marca	Suntree
Modelo / Serie	SRF-30
Corriente nominal	20 A
Tensión nominal	1000 V DC
Dimensiones	10 × 38 mm
Aplicación	Protección de strings fotovoltaicos
Tipo de corriente	Corriente continua (DC)
Normativa típica	IEC 60269-6
Uso	Sistemas fotovoltaicos on-grid y off-grid

4.4.9 Cable fotovoltaico 16 mm²

El conductor fotovoltaico de 16 mm² es un cable de uso específico para instalaciones solares, caracterizado por su robustez constructiva y su capacidad para garantizar una conducción eléctrica eficiente y confiable en la transmisión de energía generada por los módulos fotovoltaicos [27].

Tabla 7. Especificaciones técnicas del conductor eléctrico.

Parámetro	Valor
Calibre	16 mm ²
Resistencia eléctrica DC a 20 °C	1.2036 Ω/km
Espesor nominal del aislamiento	0.70 mm
Diámetro aproximado con aislamiento	6.54 mm
Espesor nominal de la cubierta	0.90 mm
Diámetro aproximado con cubierta	8.4 mm
Peso total aproximado	183 kg/km

4.4.10 Gabinete metálico pesado 60X40X20cm (Doble fondo)

El gabinete metálico se utiliza para alojar, proteger y organizar equipos y componentes eléctricos, especialmente en sistemas industriales y fotovoltaicos. Su función principal es resguardar los dispositivos contra factores externos como polvo, humedad, impactos mecánicos y manipulación no autorizada, garantizando así la seguridad y el correcto funcionamiento de los equipos instalados. Presenta una estructura monobloque con uniones perimetrales soldadas mediante proceso MIG, lo que garantiza la hermeticidad del conjunto. Dispone de puerta reversible con apertura hacia ambos lados, empaque de poliuretano expandido, cerradura universal de poliamida con tapa protectora contra polvo y bisagras reforzadas de acero. En su interior incorpora una placa de montaje para equipos con regulación de profundidad, así como un juego de soportes metálicos para su fijación a pared, asegurando una instalación firme y segura en entornos industriales y fotovoltaicos [28].

4.4.11 Ls b-0168 Breaker caja moldeada 3P 100A

Diseñado para la protección de circuitos eléctricos frente a sobrecargas y cortocircuitos en sistemas de baja tensión. Este tipo de interruptor se emplea comúnmente en tableros de distribución y sistemas industriales, incluyendo aplicaciones en sistemas fotovoltaicos y sistemas híbridos.

El interruptor presenta una corriente nominal de 100 A y es apto para operar en sistemas trifásicos de 50/60 Hz, ofreciendo protección termomagnética ajustada de fábrica. Su elevada capacidad de interrupción garantiza una desconexión segura ante fallas severas, protegiendo conductores y equipos aguas abajo [29].

4.4.12 Cable de cobre desnudo 6 7H 600V

El cable de cobre desnudo calibre 6 AWG es un conductor eléctrico utilizado principalmente en sistemas de puesta a tierra, cuya función es conducir de forma segura las corrientes de falla o descargas eléctricas hacia el sistema de tierra, contribuyendo a la protección de equipos eléctricos y a la seguridad de las personas enlaces equipotenciales y protección eléctrica.

Este conductor está fabricado con cobre electrolítico de alta conductividad, lo que garantiza una baja resistencia eléctrica y una adecuada capacidad de conducción de corriente. Su estructura está compuesta por 7 hilos trenzados, característica que le proporciona mayor flexibilidad mecánica en comparación con los conductores sólidos, facilitando su instalación en diferentes configuraciones de sistemas de protección y puesta a tierra [29].

4.5 Modelos matemáticos para el cálculo técnico, energético y económico del proyecto.

Este apartado contempla los fundamentos matemáticos usados para el dimensionado del sistema fotovoltaico propuesto, la estimación de la energía que se generará e inyectará en la red y los principales indicadores económicos, tales como el costo nivelado de la energía, el costo promedio ponderado de capital, el costo de la inversión inicial y el costo de operación.

De forma adicional, se incluye la predicción de recurso solar y de la producción del sistema fotovoltaico, a través de una red neuronal recurrente Long Short-Term Memory (LSTM) programada en Python, que permite recoger la variabilidad temporal de la

irradiación solar y predecir el comportamiento energético del sistema en el horizonte de evaluación considerado.

La articulación de estos modelos matemáticos y computacionales permite realizar una evaluación técnica y económica del proyecto, aportando los elementos cuantitativos que se requieren para la toma de decisiones y la comprobación de la viabilidad del sistema fotovoltaico híbrido acoplado a la red.

4.5.1 Potencia del Generador Fotovoltaico (kWp)

Se obtendrá de la ecuación (1).

$$PFV = \frac{E_{demanda}}{HSP \times N_{Simultaneidad}} \quad (1)$$

En donde:

$N_{simultaneidad}$: es la eficiencia depende de la carga.

PFV : potencia del generador fotovoltaico (kWp).

HSP : horas pico solar de una ubicación.

4.5.2 Número de Paneles

Se obtendrá de la ecuación (2).

$$N_{paneles} = \frac{PFV}{P_{panel}} = \frac{E_{demanda}}{P_{panel} * HSP * N_{Simultaneidad}} * 1,20 \quad (2)$$

PFV : potencia del generador fotovoltaico (kWp).

P_{panel} : es la potencia en (w) del panel seleccionado.

$N_{paneles}$: número de paneles calculado en (W) o (kW).

$N_{simultaneidad}$: eficiencia del sistema al 80%

4.5.3 Inversores

Se obtendrá de la ecuación (3)

$$I_{inversor} = \frac{P_{inversor}}{V_{sistema}} \quad (3)$$

I inversor: corriente del inversor (A)

P inversor: potencia del inversor (W)

V sistema: energía del sistema en kWh/día.

4.5.4 Calibre del conductor

Para el calibre del conductor se obtendrá de la ecuación (4).

$$A = \frac{I \times L \times 2 \times 0.0172}{S} \quad (4)$$

A : resultado del calibre

I : corriente de cortocircuito

L : longitud del conductor

0.0172: resistividad del cobre

S : seccionamiento del conductor

4.5.5 Ecuación WACC

El WACC representa la tasa de descuento utilizada para evaluar la viabilidad económica del proyecto.

$$WACC = \frac{E}{E + D} * ke + \frac{D}{E + D} * kd * (1 - T) \quad (5)$$

$WACC$: costo promedio ponderado de capital del proyecto.

E : capital propio.

D : deuda financiera.

Ke : costo del capital propio, que representa la rentabilidad exigida por los inversionistas.

Kd : costo de la deuda, asociado a la tasa de interés del financiamiento.

T : tasa de impuesto aplicable.

$E+D$: inversión total del proyecto.

$(1-T)$: beneficio fiscal de la deuda.

4.5.6 Valor Actual Neto (VAN)

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1 + WACC)^t} - I_o \quad (6)$$

VAN: valor actual neto del proyecto.

Ft: flujo de caja neto en el año *t*.

WACC: tasa de descuento del proyecto.

t: año de evaluación.

n: vida útil del proyecto (años).

I_o: inversión inicial del proyecto (CAPEX).

4.5.7 Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1 + TIR)^t} - I_o \quad (7)$$

TIR: tasa interna de retorno del proyecto.

Ft: flujo de caja neto en el año *t*.

t: año de evaluación.

n: vida útil del proyecto (años).

I_o: inversión inicial del proyecto.

4.5.8 Costo Nivelado de la Energía (LCOE)

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1 + WACC)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1 + WACC)^t}} \quad (8)$$

LCOE: costo nivelado de la energía producida.

CAPEX_t: costos de inversión en el año *t* (generalmente solo en *t* = 0).

OPEX_t: costos de operación y mantenimiento en el año *t*.

E_t: energía generada en el año *t*.

WACC: tasa de descuento.

t : año de evaluación.

n : vida útil del sistema.

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El análisis técnico y económico de los resultados obtenidos del diseño y dimensionamiento del sistema híbrido de alimentación eléctrica propuesto. En él se evaluará el comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a red eléctrica, analizando la capacidad de generación eléctrica frente a la demanda energética del grupo de bombas, así como los indicadores técnicos y económicos con los que es posible valorar la viabilidad del proyecto. Para la presentación de los resultados se han utilizado tablas, gráficos y valores obtenidos en las fases iniciales de los cálculos y de la simulación. Por último, se lleva a cabo una discusión global que vincula los resultados obtenidos con los objetivos y con el problema de investigación planteado.

5.1 Resultados del análisis de la demanda energética

Con los datos que se obtuvo de las mediciones realizada mediante el analizador de redes, se determinó la potencia eléctrica de carga del conjunto de bombas empleadas, observándose que la carga presenta un carácter estable con un consumo de potencia durante las horas de operación que varían con una potencia entre, 22,22 kW a 27,64 kW. En La Tabla 2 muestra un resumen de los datos eléctricos como valores de potencia activa, corriente y factor de potencia que se han medido en condiciones de operación normales.

De los resultados observados se constata que el sistema de bombeo es la carga principal que tiene el proyecto lo que da lugar a la necesidad de la introducción de una fuente de generación adicional que permita reducir el consumo de energía proveniente de la red de suministro eléctrica convencional.

5.2 Análisis del costo de consumo energético del sistema de bombeo mediante el pliego tarifario vigente del año 2025.

Para el caso de estudio se iniciará con la estimación del costo asociado al consumo de energía eléctrica, ya que este parámetro es fundamental para el análisis técnico-económico posterior del proyecto. Para el caso de estudio se hará como usuario de media

voltaje de bombeo agua - comunidades campesinas de escasos recursos económicos sin fines de lucro y como usuario de medio voltaje de bombeo de agua.

En la Tabla 8 contiene el consumo de energía mensual de agosto del 2025 de 3 337,44 kWh. Para determinar el costo asociado se tomó como referencia el pliego tarifario vigente del Ecuador del año 2025, clasificando al sistema como usuario de media voltaje de bombeo agua - comunidades campesinas de escasos recursos económicos sin fines de lucro, con una tarifa de 0,040 USD/kWh, sin demanda. Con base al consumo y la tarifa aplicada, el costo energético del mes analizado es de 135,36 dólares. Este costo se hará referencia para hacer el costo de total de año 2025, su precio serio de 1 624,32 dólares.

Tabla 8. Pliego Tarifario sin demanda.

Descripción	Fecha	Lectura actual	Lectura Anterior	Total	Consumo interno Transformadores	Consumo Total	Unidad de medida	Monto
Bombeo de agua	21/9/2025	664750	661478	3272	65,44	3337,44	kWh	\$133,50
Rango de consumo	Demanda USD/kW- mes	Energía	Comercialización				Subtotal	\$133,50
Nivel de Voltaje	Medio voltaje sin demanda						APG	\$1,16
	Bombeo de agua- comunidades campesinas						Total	\$135,36
	0	0,04	0,7					

En la Tabla 9 se ve el consumo de energía mensual de agosto del 2025 de 3 337,44 kWh. Para determinar el costo asociado se tomó como referencia el pliego tarifario vigente del Ecuador del año 2025, clasificando al sistema como usuario de media voltaje de bombeo agua con demanda, con una tarifa de 0,077 USD/kWh, a la que se suma el cargo por demanda. Con base en este consumo y la tarifa aplicada, el costo energético del mes analizado es de 381,48 dólares, lo que proyectado de forma anual representa un gasto de 3.845,69 dólares. Como el caso anterior se tomará este costo para calcular el costo de total de año 2025, su precio serio de 1 624,32 dólares.

Tabla 9: Pliego Tarifario con demanda.

Descripción	Fecha	Lectura actual	Lectura Anterior	Total	Consumo interno Transformadores	Consumo Total	Unidad de medida	Monto
-------------	-------	----------------	------------------	-------	---------------------------------	---------------	------------------	-------

Bombeo de agua	21/9/2025	667937	664750	3187	63,74	3250,74	kWh	\$250,31
Demanda facturable	21/9/2025	27,64		27,64	0	27,64	kW	\$126,48
Rango de consumo	Demanda USD/kW- mes	Energía	Comercialización				Subtotal	\$376,79
Nivel de Voltaje	Medio voltaje con demanda						APG	\$3,28
	Bombeo de agua						Total	\$381,48
	4,576	0,077	1,414					

5.3 Simulación en PVsyst para el sistema fotovoltaico

Con la finalidad de comprobar el desempeño energético del sistema fotovoltaico propuesto en el trabajo titulado, se realizó la simulación utilizando el software específico PVsyst.

En dicha simulación se modeló el arreglo fotovoltaico formado por los módulos JA Solar de 585 Wp, modelo JAM78S30-585-MR, siguiendo las especificaciones eléctricas que el fabricante proporciona, así como las condiciones climáticas del lugar de instalación junto con la configuración del inversor, pérdidas por temperatura, cableado, entre otros aspectos, para poder obtener en la estimación de la producción energética del sistema una estimación verosímil.

Los resultados obtenidos por PVsyst dejaron conocer la energía anual que se espera obtener, la eficacia energética del sistema y los índices de pérdidas, toda esta información fundamental para comprobar que la producción del sistema fotovoltaico es capaz de satisfacer la demanda del conjunto de bombas y para poder justificar la viabilidad técnica del sistema híbrido propuesto.

A continuación, se muestra en la Tabla 10 el resultado de la simulación del arreglo del sistema fotovoltaico.

Tabla 10. Características del conjunto fotovoltaico.

Categoría	Parámetro	Valor
Panel solar	Fabricante / Modelo	JA Solar JAM78S30-585/MR
Panel solar	Potencia nominal del módulo	585 Wp
Panel solar	Número de módulos	75 Und
Panel solar	Potencia total nominal (STC)	42,86 kWp

Panel solar	Configuración	5 strings de 15 módulos en serie
Panel solar	Potencia a 50 °C (Pmpp)	34,2 kWp
Panel solar	Tensión en MPP (Umpp)	644 V
Panel solar	Corriente en MPP (Impp)	53 A
Panel solar	Área total de módulos	179 m ²
Inversor	Fabricante / Modelo	Huawei SUN2000-50KTL-M3-220V
Inversor	Potencia nominal	50.0 kWac
Inversor	Potencia máxima	55.0 kWac
Inversor	Número de inversores	1 Und
Inversor	Rango de tensión de operación	200 – 1000 V
Sistema	Relación DC/AC (Pn ratio)	0.94

En la Tabla 10 se puede observar la selección de los paneles solares JAM78S30-585-MR, con una potencia nominal de 585 Wp por unidad. El sistema está conformado por un total de 75 módulos, lo que resulta en una potencia instalada nominal bajo condiciones estándar (STC) de 42,86 kWp.

Con una configuración eléctrica del campo fotovoltaico de 5 strings en paralelo, cada uno compuesto por 15 módulos en serie, garantizando una adecuada adaptación a la ventana de operación del inversor.

El inversor funciona en el rango de tensión de entrada, que oscila entre 200 V y 1000 V, y su potencia máxima es de 55 kW AC y asegura un correcto funcionamiento incluso con variaciones en la temperatura ambiente.

5.4 Dimensionamiento fotovoltaico

Para el dimensionamiento de sistema fotovoltaico se aplicará la ecuación (2) en la Tabla 11 donde se obtiene el número de paneles para el sistema fotovoltaico. En esta tabla se visualizará la cantidad de paneles solares necesarios para cubrir la potencia del sistema de bombeo. El arreglo final considera 48 módulos de 585 Wp, alcanzando una potencia total instalada de 43,875 kW. La potencia de 42,86kW corresponde a potencia pico al arranque de la bomba.

Tabla 11. Cálculo de los paneles solares.

Cálculo de paneles solares	
Potencia pico	42,86kW
Potencia del panel	585 Wp
Número de paneles	73,26
Arreglo de paneles	75 und
Potencia total	43875 w

Con los datos que se obtuvieron de la simulación y de la que se resolvió matemáticamente coinciden que corresponden a 75 paneles, con lo que se procede con los cálculos correspondientes para conocer si es viable el proyecto.

5.5 Cálculo del calibre del conductor

En la Tabla 12 se realiza el cálculo correspondiente para ver la caída de tensión en la conexión de los paneles solares con el propósito de elegir el conductor adecuado, este cálculo se emplea la ecuación (4). Esto corresponde a la conexión en serie de 15 paneles dando un 2,38% de caída de tensión, que en normas es aceptable.

Cabe mencionar que para esta parte se usó el conductor de calibre 10 con una sección de 6mm^2 .

Tabla 12. Dimensionamiento de conductor para el FV.

Numero de paneles	15 Und
Longitud	30 m
Sección de conductor	6mm^2
Corriente de cortocircuito	13,88 Isc
Resistividad del cobre	$0,0172 \Omega$
Caída de tensión	2,38%

El diseño de sistema fotovoltaico cuenta con 5 string, entonces se procederá a calcular de la misma manera para el resto de string que en el caso se obtendrá el mismo porcentaje de caída.

En la Tabla 13 se calcula el conductor que se conecta del inverso hacia el panel de control donde se conecta el sistema On-Grid. La caída de tensión que se tiene del inversor al panel principal de AC es de 2,15% que no excede el porcentaje de caída de tensión de 3%. Para este cálculo se tomará de referencia del conductor de calibre 6 con una sección de $13,3\text{mm}^2$.

Tabla 13. Dimensionamiento de conductor al inversor hacia el tablero AC.

Número de inversores	1 Und
Longitud	30 m
Sección de conductor	$13,3\text{mm}^2$
Corriente	86,2 A
Resistividad del cobre	$0,0172 \Omega$

cos φ	0,85
VLL	228,4 V
Caída de tensión	2,15%

5.6 Cálculo de las protecciones en DC

Se procederá a evaluar el voltaje de los string de los paneles y su corriente, estos nos servirán para la elección de los fusibles, protección termomagnética y seccionador. Esto se podrá evaluar en la Tabla 14.

Tabla 14. Cálculo de tensión y corriente del FV de 4 string.

Tensión de los paneles		Corriente	
Voc	53,2 V		
Numero de paneles en serie	15 und	Isc del panel FV	13,88 A
Factor de corrección	1,19	Factor de corrección	1,25
Tensión	954,94 V	Corriente	17,35 A

Mediante la Tabla 14 se podrá seleccionar el fusible que las caracterizas sea que sea mayor al voltaje de 954,94 V y la corriente de 17,35. De misma manera debe cumplir la elección del seccionador y protección termomagnética. Estos elementos se pueden apreciar en la etapa de materiales.

5.7 Estimación de la energía generada por el sistema fotovoltaico

La evaluación de la energía producida por un sistema fotovoltaico es una fase primordial en el diseño y la puesta en marcha de proyectos de generación solar, ya que le permite al desarrollador del proyecto aproximar la energía eléctrica generada por el sistema a partir del recurso solar disponible en el lugar de estudio y aplicar las características técnicas de los módulos fotovoltaicos, el inversor, las condiciones medioambientales y las pérdidas por sí mismo del sistema.

Para el cálculo de la energía generado por el sistema FV se utiliza la ecuación (1) en la Tabla 15 muestra la estimación de la energía generada por el sistema fotovoltaico de 43875 W. Considerando un HSP promedio de 4,93 h/día y un performance ratio de 0.89, se obtiene una producción energética de 192,51 kWh/día, 5775,31 kWh/año, y al año

69303,72 kWh/año lo que demuestra el alto rendimiento y la viabilidad del sistema propuesto.

Tabla 15. Energía generada por el sistema fotovoltaico.

Potencia instalada	43875 W
Horas solares pico	4,93 h
PR	0,89
Energía diaria	192,51 kWh/día
Energía mensual	5775,31 kWh/mes
Energía anual	69303,72 kWh/año

5.8 Elección del inversor

Como parte fundamental para este proyecto se incluye el procedimiento del cálculo y elección del dispositivo inversor empleado en el sistema fotovoltaico propuesto, donde se considera la potencia total del arreglo de los paneles, el rango de tensiones de trabajo, la corriente máxima tolerable y los criterios de dimensionados recomendados por parte de los fabricantes. Este análisis permite comprender que la elección correspondiente al inversor es capaz de trabajar con seguridad y eficacia, asegurando una adecuada interacción entre el sistema solar, la red eléctrica y el conjunto de bombas del proyecto.

En la Tabla 16. Cálculo de la potencia del inversor. se muestra el cálculo del inversor, que para esto se aplica un factor de sobredimensionamiento de 1,7, donde el valor de la potencia del inversor es 51kW.

Tabla 16. Cálculo de la potencia del inversor.

Potencia bomba	30 kW
Factor sobredimensionamiento	1,7
Potencia del inversor	51 kW

Entonces como se observó en la Tabla 16 donde nos da de cuanto debe ser el inversor, para ello se elegirá un inversor de 50kw

5.9 Resultados del análisis de la irradiación solar

5.9.1 Datos de la irradiación solar

Con la información histórica de irradiación solar obtenida para la zona de estudio y que posteriormente fue tratada a través de técnicas de predicciones se llegó a su comportamiento anual del recurso solar disponible.

En la Tabla 17 se muestra los valores obtenidos de PVGIS, esto datos históricos son tomados anualmente de la irradiación solar.

Tabla 17. Datos históricos de la irradiación solar de la ubicación del sitio estudiado.

Año	Irradiacion_kWh_m2_año
2005	1889,74
2006	1865,54
2007	1898,05
2008	1818,45
2009	1855,19
2010	1865,25
2011	1806,28
2012	1852,53
2013	1848,43
2014	1827,32
2015	1850,48
2016	1863,41
2017	1836,85
2018	1829,17
2019	1812,23
2020	1847,02
2021	1749,68
2022	1803,14
2023	1738,45
2024	1882,60

Para el análisis del pronóstico de energía se tendrá el promedio general de la irradiación solar de los datos históricos, este valor es de 1836,99 kWh/m². año.

5.9.2 Análisis y pronóstico de la irradiación solar

En la predicción de la radiación solar se llevó a cabo una red neuronal recurrente del tipo Long Short-Term Memory (LSTM) con arquitectura de tipo Seq2Seq. Este modelo se eligió por su habilidad para modelar las dependencias temporales a largo plazo presentes

en las series de datos meteorológicos, lo que permite contemplar la variabilidad y la estacionalidad de la radiación solar. Este tipo de modelo se realizó en lenguaje de programación Python, empleando librería especializada en aprendizaje como Tensor Flow/Keras y herramientas de procesamiento de datos como NumPy y Pandas.

En la Tabla 18 muestra los valores anuales de irradiación solar pronosticado total de forma acumulativa, en kWh/m²·año para el periodo de tiempo presente en los años 2024 a 2039. Estos valores obtenidos son el resultado del pronóstico de irradiación solar obtenido mediante el modelo de red neuronal LSTM Seq2Seq programado en Python, y son los datos necesarios para realizar la estimación de la energía generada por el sistema fotovoltaico diseñado.

Tabla 18. Pronóstico de la irradiación solar.

Año	Irradiacion_kWh_m2_anual
2024	1808,40
2025	1808,15
2026	1808,15
2027	1808,15
2028	1808,15
2029	1808,15
2030	1808,15
2031	1808,15
2032	1808,15
2033	1808,15
2034	1808,15
2035	1808,15
2036	1808,15
2037	1808,15
2038	1808,15
2039	1808,15

El promedio anual de irradiación obtenido fue 1808,40 kWh/m². año, valor que se encuentra dentro del rango típico para la región ecuatoriana, con la cual se puede asegurar una viabilidad de aprovechamiento solar para generación fotovoltaico.

Con el fin de evaluar la consistencia y confiabilidad del pronóstico de irradiación solar obtenido, se calculó la diferencia porcentual entre los valores promedio históricos y los valores promedio multianuales, permitiendo analizar la estabilidad del recurso solar y la validez de los datos empleados en la simulación del sistema fotovoltaico.

Donde se obtuvo un 0,005%, esta pequeña variación demuestra que los datos utilizados son representativos y confiables para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico. Además, confirma que el recurso solar presenta una estabilidad adecuada para garantizar una producción energética predecible a lo largo de la vida útil del sistema.

5.10 Resultados del análisis de la generación por el sistema fotovoltaico

La presente sección comprende el análisis cuantitativo de la producción de energía eléctrica del sistema FV, estimados a partir del pronóstico del recurso solar y del modelo de producción del sistema en sí. El análisis que se realiza se basa en los valores de irradiación solar, calculados previamente por las técnicas de aprendizaje profundo, que permite la proyección del comportamiento energético del sistema fotovoltaico a lo largo del horizonte de estudio.

En Tabla 19 presenta los valores mensuales de energía eléctrica consumida durante un año, esta corresponde del 2025, expresados en kilovatios-hora. En la cual el promedio en dicho año es de 3061, 19 kWh.

Tabla 19. Energía consumida.

Energía consumida KWh 2025	
ENERO	3184,44
FEBRERO	2992,68
MARZO	2528,58
ABRIL	3119,16
MAYO	3044,7
JUNIO	3147,72
JULIO	3096,72
AGOSTO	3337,44
SEPTIEMBRE	3250,74
OCTUBRE	3014,1
NOVIEMBRE	3119,16
DICIEMBRE	2898,84
PROMEDIO	3061,19

Con la ayuda de la programación en Python aplicando la red neuronal LSTM Seq2Seq se obtuvo la energía generada durante los 12 meses del año. En la Tabla 20 representa los valores mensuales pronosticados de la energía generado AC por el sistema fotovoltaico durante el año 2025.

Tabla 20. Energía AC generada.

Energía AC generado kWh/mes (2025)	
ENERO	3752,69
FEBRERO	3444,41
MARZO	3650,14
ABRIL	3551,96
MAYO	3605,95
JUNIO	3417,01
JULIO	3687,64
AGOSTO	4225,52
SEPTIEMBRE	4395,98
OCTUBRE	4142,16
NOVIEMBRE	3679,64
DICIEMBRE	3670,52
PROMEDIO	3768,63

El consumo eléctrico mensual promedio durante el año 2025 es de 3768,63 kWh, con valores entre un mínimo de 3417,01 kWh en junio y un máximo de 4395,98 kWh en septiembre, lo que refleja variaciones asociadas a la operación del sistema y a factores estacionales.

En la comparación entre ambos perfiles de generación de energía y el consumo, se puede concluir que, para la mayor parte de los meses del año la energía AC generada a partir del sistema fotovoltaico es superior a la energía demandada, mostrando, así como el sistema de autoconsumo desarrollado sería capaz de satisfacer la demanda eléctrica mensual promedio y, además, podría producir un excedente.

Este excedente podría llegar a ser valorizado por medio de los esquemas de inyección a la red y/o compensación energética, vale decir, de acuerdo con el esquema de conexión que se adoptara. En términos generales, el típico promedio de generación AC es aproximadamente un 17,6 % superior que la energía consumida, lo que revela un dimensionado correcto del sistema fotovoltaico que avala la viabilidad técnica de desarrollo como un sistema de autoconsumo con la red eléctrica como respaldo.

En definitiva, los resultados que se muestran en la tabla permiten conocer el rendimiento real del sistema fotovoltaico, dada la energía AC, que es el valor real de generación que se tiene en términos de autoconsumo o inyección a la red. Estos resultados representan la materia prima que se incorpora al análisis de la cobertura de la demanda eléctrica, así como al análisis técnico-económico del proyecto.

5.11 Análisis económico

En esta sección se hará el análisis económico correspondiente al sistema fotovoltaico puesto a punto con el fin de evaluar su viabilidad financiera, y conveniencia como alternativa de generación eléctrica frente a la oferta convencional de la red. En el análisis se tienen en cuenta toda la tipología de costes a los que da lugar la instalación, operación y mantenimiento del sistema, como también los beneficios económicos que se generan mediante la producción energética partir de la fuente renovable.

Para ello, se consideran los costes de inversión inicial (CAPEX), costes de operación y mantenimiento (OPEX), así como también indicadores económicos generalmente usados en proyectos energéticos como son el Costo Nivelado de la Energía (LCOE) y el Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC) con el fin de ponerle cantidad al coste real de la energía producida por el sistema FV durante su vida útil, y así, hacer las comparaciones de rendimiento económico del sistema fotovoltaico frente a otras alternativas de generación.

Por otro lado, el análisis económico se realiza en paralelo con los resultados obtenidos mediante la previsión de generación energética, lo que permite evaluar los flujos de energía y costes en un horizonte evaluativo de manera realista. De este modo, se acaba por ofrecer una imagen general del impacto económico del sistema fotovoltaico, lo cual proporcionará una buena base para la toma de decisiones, no solamente del sistema fotovoltaico sino también del resto de las alternativas energéticas que se puedan conseguir con la oferta energética en estudio.

Como parte de estudio económico se realizará en dos casos, que son aplicando los dos diferentes pliegos tarifarios obtenidos anteriormente.

5.11.1 WACC

Para el análisis económico será necesario conocer el WACC para el sistema fotovoltaico ya que este resultado tendrá un impacto directo en el cálculo de LCO, donde esta puede reducir o aumentar el costo nivelado de energía.

En la Tabla 21 se calculará el costo promedio ponderado de capital utilizando la ecuación (5), de igual manera se verá los parámetros financieros necesarios para estimar el WACC.

Tabla 21. Dedución del costo medio ponderado del capital.

Costo medio ponderado WACC

ke		Costo del capital propio
Rf	5,59	Tasa Libre de riesgo
Beta	1,07	Riesgo sistemático
Rm	10,59	Rendimiento del mercado
CAPM	10,94	Ke
kd	25	Costo de la deuda
E	70	Capital propio (Equity)
D	30	Deuda
T	0,25	Tasa de impuesto a la renta
D+E	0,7	Suma de D más E
E+D	0,3	Sum de E más D
(1-T)	0,75	
WACC	13,28	Costo medio ponderado

El WACC obtenido es de 13,28% que representa la tasa mínima de rentabilidad exigida para el proyecto fotovoltaico. Si el proyecto genera menos 13,28%, entonces el proyecto no es rentable económicamente, mientras que si proyecto generado es igual o más que el valor calculado es económicamente viable.

5.11.2 Costo de inversión inicial (CAPEX) del sistema fotovoltaico

Para obtener el CAPEX se realizó con los precios que hay en el mercado ecuatoriano para que no exista desfases en los precios de la inversión.

En la Tabla 22 se conocerá los distintos componentes esenciales para el sistema fotovoltaico, esta nos permitirá obtener el valor de inversión que es de \$25.129,12.

Tabla 22. Costo de inversión inicial del proyecto.

Ítem	Producto	Especificación / Nota	Unidad	Cantidad	Precio unitario (USD)	Subtotal (USD)
1	Módulos FV	Panel FV 580-585 Wp- Monocristalino	und	75	149,5	11212,5
2	Inversor	Inversor On-Grid 50kW, 3Φ 220 V	und	1	9.240	9.240
3	Estructura	Estructura acero + herrajes	lote	1	795,1	795,1
4	Caja combinador DC	Para 3 strings, gabinete IP65 con los componentes	und	1	518,132	518,132
5	Cable solar DC	Calibre 10	M	200	2,27	454
6	Conectores DC	MC4 compatibles	par	5	5,5	27,5
7	Cable solar DC	Cable solar PV 16 mm ² , cobre, 1000 Vdc	M	20	21,88	437,6

8	Tablero AC	Tablero interconexión 60x40x20	und	1	85,67	85,67
9	Breaker principal AC	MCCB 3P 100A	und	1	66,15	66,15
10	Seccionador AC	Seccionador 3P	und	1	222,64	222,64
11	SPD AC	Protección sobretensión Tipo 2 AC	und	1	105	105
12	Cable AC potencia	XLPE 13,3mm ² (3F+PE)	M	10	12,5	125
13	Puesta a tierra	Varillas + conectores	lote	3	20	60
14	Conductor PE	Cable tierra 16 mm ²	M	100	2,38	238
15	Medidor bidireccional	Medidor Trifásico Elster 10(100) A 230/400V Bidireccional Directo	Und	1	441,83	441,83
16	Transporte	Fletes y logística	serv	1	100	100
17	Mano de obra	Instalación eléctrica y FV	serv	1	1000	1000
					CAPEX TOTAL (USD)	\$25.129,12

5.11.3 Costos de operación y mantenimiento (OPEX)

La Tabla 23 presenta el OPEX, que es considerado un indicador clave para calcular el costo nivelado de la energía (LCOE) del sistema fotovoltaico.

El OPEX refleja los gastos de mantenimiento preventivo y correctivo; las inspecciones periódicas de los módulos fotovoltaicos; la limpieza de módulos fotovoltaicos e incluso otros gastos que son imprescindibles para asegurar el funcionamiento del sistema a través de su vida útil. Por lo tanto, la introducción del OPEX en el LCOE da lugar a una estimación más realista del costo de generación de la electricidad, pues cuantifica la inversión inicial y los gastos recurrentes del proyecto los cuales son de \$1.267,94.

Tabla 23. Costos de operación y mantenimiento del proyecto.

Ítem	Concepto	Criterio / Nota	Unidad	Valor	Costo unitario (USD)	Costo anual (USD)
1	Mantenimiento preventivo	% del CAPEX (típico 1–2%/año)	%	0,015		\$376,94
2	Limpieza de módulos	N° limpiezas/año × costo por limpieza	n/año	5	\$25,00	\$125,00

3	Monitoreo	Servicio anual	Año	1	\$80,00	\$80,00
5	Administración / operación	Costos operativos varios	Año	1	\$40,00	\$40,00
6	Repuestos menores	Conectores, fusibles, etc.	Año	1	\$30,00	\$30,00
7	Reserva reemplazo inversor	Costo reemplazo / vida (10–15 años)	Año	1	\$616,00	\$616,00
					OPEX ANUAL TOTAL (USD)	\$1.267,94

5.11.4 Determinación del costo nivelado de energía LCOE

Para llevar a cabo el cálculo del Costo Nivelado de la Energía (LCOE) se utiliza la ecuación (8), que considera el costo de inversión inicial, el costo de operación, costo de mantenimiento y el costo de energía eléctrica producida por un sistema fotovoltaico durante su vida útil. Para esto se utilizan los valores de energía pronosticada del sistema fotovoltaico, obtenidos de la estimación del recurso solar y del modelo de generación energética para este sistema, así como los parámetros de tipo económico y financiero que ya se han determinado.

Como resultado del análisis económico el LCOE obtenido para este proyecto es de 0,1067 USD/kWh, valor que no se encuentra dentro del rango competitivo para centrales de generación fotovoltaico para el año 2026.

5.11.5 La Tasa Interna de Retorno (TIR)

En este apartado se realizará el cálculo de la Tasa Interna de Retorno del proyecto fotovoltaico propuesto, cuya finalidad es valorar la rentabilidad económica del sistema durante su vida útil. La TIR para este proyecto es uno de los principales ratificadores económicos para la toma de decisiones de inversión.

En contexto para conocer el TIR se procura con la ayuda de la ecuación (7). Este análisis conlleva con dos tipos de usuarios.

En este análisis se tomará como usuario de medio voltaje al bombeo de agua - comunidades campesinas de escasos recursos económicos sin fines de lucro. Donde el TIR es de 2% que es inferior a WACC que quiere decir que este proyecto no es viable.

Para otro análisis se acogerá como usuario de medio voltaje de bombeo agua con demanda donde el valor el TIR es 21%. Este valor es aceptable ya que es mayor que 13,283% correspondiente al WACC por lo tanto el proyecto es viable.

Si el valor del TIR fuera similar al del WACC el proyecto no se perdería ni se ganará sin embargo si el TIR fuera inferior el proyecto estaría en pérdida.

5.11.6 Cálculo de Valor Actual Neto (VAN)

Acto seguido se desarrolla el cálculo del Valor Actual Neto del proyecto fotovoltaico propuesto, que con esto conlleva la viabilidad económica del proyecto y el valor que aporta el proyecto durante su vida útil. El VAN constituye uno de los principales indicadores financieros para la evolución de proyecto planteado ya que permite medir el beneficio económico neto que puede generar siendo considerado el valor del dinero en el tiempo.

Para encontrar el valor del VAN se aplicará la ecuación (6). De igual manera se proceera en análisis con dos tipos de usuarios.

En la Tabla 24 como usuario de medio voltaje de bombeo de agua - comunidades campesinas de escasos recursos económicos sin fines de lucro, donde Ft que corresponde a flujo de caja neto generado por el proyecto, que es de \$11.289,26 que son los beneficios obtenidos durante el periodo de evaluación. También se tiene el CAPEX con un valor de \$25.129,12. A partir de esto se obtiene el VAN que es de -\$13.839,88 lo que indica los beneficios económicos actualizados. este resultado indica que el proyecto no es viable económicamente y rentable.

Tabla 24: Calculo del VAN como usuario de medio voltaje de bombeo de agua - comunidades campesinas

Cálculo del VAN	
Ft	\$11.289,26
CAPEX	\$25.129,12
VAN	-\$13.839,86

En la Tabla 25 como usuario de medio voltaje de bombeo de agua con demanda, donde Ft que corresponde a flujo de caja neto generado por el proyecto, que es de \$42.065,11 que son los beneficios obtenidos durante el periodo de evaluación. También se tiene el CAPEX con un valor de \$25.129,12. A partir de esto se obtiene el VAN que es de

\$16.935,99 lo que indica los beneficios económicos actualizados. este resultado indica que el proyecto es viable económicamente y rentable.

Tabla 25. Cálculo de VAN como usuario de medio voltaje de bombeo agua con demanda

Cálculo del VAN	
Ft	\$42.065,11
CAPEX	\$25.129,12
VAN	\$16.935,99

5.11.7 Periodo de recuperación el proyecto

Esta sección se analizará el costo de recuperación con el objetivo de determinar el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial realizada en el sistema fotovoltaico propuesto. Aplicando con dos tipos de usuarios.

En la Tabla 26 presenta el análisis del período de recuperación de la inversión para el usuario de medio voltaje de bombeo de agua - comunidades campesinas de escasos recursos económicos sin fines de lucro se muestra este tiempo de recuperación, donde es necesario la aplicación del CAPEX y beneficio del proyecto. A partir de estos valores se determinó que es de 30,38 años, lo que indica que la inversión inicial no será recuperable.

Tabla 26: Periodo de recuperación del proyecto como usuario de medio voltaje de bombeo de agua - comunidades campesinas de escasos recursos económicos sin fines de lucro.

Periodo de recuperación el proyecto	
CAPEX	\$25.129,12
Beneficio	\$827,02
Periodo de recuperación	30,38 años

En la Tabla 27 presenta el análisis del período de recuperación de la inversión para el usuario de medio voltaje de bombeo de agua con demanda se muestra este tiempo de recuperación, donde es necesario la aplicación del CAPEX y beneficio del proyecto. A partir de estos valores se determinó que es de 5,95 años, lo que indica que la inversión inicial será recuperada aproximadamente en ese periodo de tiempo.

Tabla 27: Periodo de recuperación del proyecto como usuario de medio voltaje de bombeo de agua con demanda.

Periodo de recuperación el proyecto

CAPEX	\$25.129,12
Beneficio	\$4.222,19
Periodo de recuperación	5,95 años

5.12 Costos de comparación de sistema fotovoltaico

Como parte final se realizará un análisis entre el costo del precio total entre lo consumido y lo pronosticado. En la Tabla 28 se aprecia el precio de costo con la energía kW/año aplicando los dos tipos de usuarios.

Tabla 28. Costos de comparación.

	kWh	Tarifa	Monto año
Energía kW/año pronosticado	66124,85	0,04	2644,994
	66124,85	0,077	5091,61345
Energía kW/año según consumido	36734,28	0,04	\$1469,3712
	36734,28	0,077	\$2828,53956

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La revisión bibliográfica realizada permitió establecer fundamentos teóricos y conceptuales necesarios para la evaluación de sistemas fotovoltaicos híbridos aplicados al bombeo de agua. Se identificaron los principales indicadores de factibilidad empleados en proyectos de generación renovable, entre los que destacan el Costo Nivelado de Energía (LCOE), el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC), los cuales constituyen herramientas cuantitativas ampliamente utilizadas para evaluar la viabilidad técnica y económica de este tipo de proyectos.
- En la evaluación técnica del conjunto de bombas del sector Chan-Chico, alimentado exclusivamente por la red eléctrica convencional de la cual se realizó la medición con un analizador de redes (Fluke 435-II) registrando una potencia máxima de 27,6 kW con una tensión de 228,2 V y un factor de potencia de 0,85, parámetros que caracterizan el perfil de la demanda eléctrica del sistema y constituye la base para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico híbrido propuesto.
- En el dimensionamiento del sistema fotovoltaico híbrido para el conjunto de bombeo del sector Chan Chico quedó conformado por 75 módulos JA Solar JAM78S30-585/MR de 585 Wp cada uno, organizados en 5 strings de 15 módulos en serie, con una potencia total instalada de 42,86 kWp.
- El pronóstico de generación energética obtenido mediante el modelo de red neuronal LSTM Seq2Seq arrojó una producción de energía Ac de 66124,85 kWh/año, estimada a partir de FR de 0,892 y un HSP promedio de 4,93h/día.
- La selección adecuada de los módulos fotovoltaicos, el inversor y los sistemas de protección contribuye a garantizar una operación segura, continua y acorde a las condiciones eléctricas del sistema existente, para garantizar un eficiente funcionamiento del sistema híbrido.
- El pronóstico de la irradiación solar y de la producción energética a largo plazo permitió estimar el comportamiento futuro del sistema bajo condiciones reales de operación. Este análisis prospectivo aporta un mayor grado de certeza en el diseño y planificación del sistema, ya que considera la variabilidad del recurso solar y su

influencia en la generación energética anual. De esta manera, el estudio no se limita a un análisis estático, sino que incorpora una visión técnica orientada a la sostenibilidad y a la planificación energética del sector.

- En la valoración económica del sistema fotovoltaico híbrido propuesto para el sector Chan Chico demuestra su viabilidad financiera a través de los principales indicadores de factibilidad. El Costo Nivelado de Energía (LCOE) de 0,1067 USD/kWh donde resulta no competitivo para el sistema fotovoltaico en Ecuador. En el análisis de la tasa interna de retorno aplicando los dos de usuarios se obtuvo del usuario bombeo de agua- comunidades campesinas de escasos recursos económicos sin fines de lucro, su TIR es de 2 y de bombeo de agua con demanda es de 21%. En este indicar se sustenta que de igual forma el proyecto no es viable.
- Finalmente, la presente investigación no solo aporta una solución técnica orientada a la optimización energética, sino que también responde a una necesidad social fundamental, como es el abastecimiento continuo de agua en comunidades rurales. La incorporación de un sistema fotovoltaico híbrido en el sector Chan Chico representa una alternativa sostenible que mejora la confiabilidad del servicio, promueve el uso de energías renovables y contribuye al desarrollo energético local. En este sentido, el proyecto establece bases técnicas y metodológicas que pueden ser replicadas en sistemas de bombeo similares, fortaleciendo la transición hacia soluciones energéticas más eficientes, confiables y sostenibles.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda implementar el sistema fotovoltaico híbrido considerando las condiciones reales de operación del sistema de bombeo, ya que la dependencia exclusiva de la red eléctrica representa un factor de vulnerabilidad ante interrupciones del servicio. La integración de la generación solar como fuente complementaria permitiría mejorar la continuidad operativa y reducir la inestabilidad energética observada durante los periodos de mayor demanda.
- Se recomienda mantener un monitoreo periódico de las variables eléctricas del sistema de bombeo mediante equipos de medición, con el fin de analizar el comportamiento real del consumo energético, especialmente durante los picos de arranque de las bombas. El seguimiento continuo de parámetros como potencia,

corriente y factor de potencia permitirá optimizar la gestión energética y validar el desempeño del sistema fotovoltaico híbrido en condiciones reales.

- Desde el punto de vista económico, se recomienda realizar evaluaciones periódicas de los indicadores de factibilidad, tales como el VAN, la TIR y el LCOE, considerando posibles variaciones en la tarifa eléctrica y en los costos de mantenimiento. Esto permitirá obtener una visión más realista de la sostenibilidad financiera del sistema a lo largo de su vida útil y facilitar la toma de decisiones sobre futuras ampliaciones o mejoras del proyecto.
- Se recomienda que futuras investigaciones incorporen el análisis de sistemas de almacenamiento energético y escenarios climáticos a largo plazo, con el propósito de incrementar la autonomía energética del sistema de bombeo y reducir aún más la dependencia de la red eléctrica. De esta manera, se fortalecería la confiabilidad del suministro de agua y la sostenibilidad energética en comunidades rurales con características similares al sector Chan Chico.

7 REFERENCIAS

- [1] J. C. Schallenberg Rodríguez *et al.*, *Energías renovables y eficiencia energética*. 2008. [En línea]. Disponible en: www.renovae.org,
- [2] e. d. p. s. Alvaro Enrique Cueva Urgilez y G. -Ecuador, “ESPOL-Magister en”, Guayaquil - Ecuador, sep. 2019.
- [3] “¿Qué es PVsyst? Conoce el software | Mint”. Consultado: el 9 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://mintforpeople.com/noticias/pvsyst/>
- [4] “CaseGuard | LSTM y redes neuronales, un enfoque del aprendizaje profundo”. Consultado: el 9 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://caseguard.com/es/articles/lstm-y-redes-neuronales-un-enfoque-del-aprendizaje-profundo/>
- [5] R. A. J. V. Deivis Ávila-Prats, “Artículo Original Hybrid systems with base in the renewable energy for the energy supply to desalination plants”, dic. 2011, Consultado: el 21 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v14n1/im03111.pdf>
- [6] Neidaly Sanchez Gallego, “Diseño de un sistema híbrido eólico solar para el bombeo de agua”, ene. 2016, Consultado: el 21 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/4dffcc44-a715-4e46-a110-e79b7737c048/content>
- [7] Joseph Anthony González Morales Mauricio Andrés Rebolledo Román, “Escuela superior politécnica del litoral”, 2020. Consultado: el 21 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/57211/1/T-113106%20%20Gonz%C3%A1lez%20-%20Rebolledo.pdf>
- [8] M. Ángel, H. Marín, P. Daniel, y V. Salas, “Pontificia Universidad Católica Del Perú Facultad De Ciencias E Ingeniería”.
- [9] “Global Solar Atlas”. Consultado: el 22 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://globalsolaratlas.info/map?c=-22.390714,-73.125,4>
- [10] “Novum Solar”. Consultado: el 21 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://novumsolar.com/como-aprovechar-la-energia-solar/>

- [11] “¿Qué es un sistema fotovoltaico y cómo funciona? | Enel X”. Consultado: el 5 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work>
- [12] “Paneles solares fotovoltaicos para sistemas de energía solar”. Consultado: el 5 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.renova-energia.com/categoria-producto/paneles-solares/>
- [13] “Paneles solares: qué son, cómo funcionan y cuál es su futuro”. Consultado: el 5 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-los-paneles-solares-como-funcionan-y-cual-es-su-futuro/>
- [14] “Diferencias entre silicio monocristalino y policristalino”. Consultado: el 5 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/diferencias-entre-silicio-monocristalino-y-multicristalino-o-policristalino>
- [15] D. H. B. Ángela Aguirre L., “Comparación de eficiencias de conversión de energía en celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino, policristalino y amorfo para mediciones meteorológicas de la ciudad Santiago de Cali.” Consultado: el 5 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://inm.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/Trabajo-No.5.pdf>
- [16] “Funcionamiento y aplicaciones de los inversores CC-CA - Samlex”. Consultado: el 5 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://samlex.com/es/elementor-9882/>
- [17] “Fluke 434-II/435-II/437-II Analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica”, 2012.
- [18] “Analizador De Calidad De Energia Trifasico - Fluke 435-II - Electrónica Universal”. Consultado: el 9 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.electronicauniversal.com.mx/tienda/fluke/analizadores-de-calidad-de-energia/hfluke435-ii/>

- [19] “Fluke 435-II | Analizador de Calidad de Energía Clase A | QVM Chile | QVM”. Consultado: el 9 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://qvm.cl/arriendo/fluke-435-ii>
- [20] “Redes Neuronales LSTM”. Consultado: el 9 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ciberseguridadmax.com/lstm/>
- [21] “everythingPE”. Consultado: el 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.everythingpe.com/products/solar-panels-cells/ja-solar/1057-372-jam78s30-585-mr>
- [22] “monsolar.com”, Consultado: el 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.monsolar.com/huawei-sun2000-30ktl-m3.html>
- [23] “Sifa Store”. Consultado: el 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://sifastore.sifaconweb.com/product/disyuntor-breaker-solar-dc-63a-1000v-2/?utm_source
- [24] “TAB (Tecnologías en Acumuladores y Baterías)”. Consultado: el 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://tab-solar.com/producto/protector-contra-sobretensiones-spd-dc-paneles/>
- [25] “Amazon”. Consultado: el 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.com/PXRZXBICQ-Holder-Voltage-System-Protection/dp/B0DD3R6QFY>
- [26] “Rising Sun Ecuador”. Consultado: el 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.risingsunecuador.com.ec/fusible-solar-pv-dc-20a-10x38?utm_source
- [27] “Electrificadora Capital”. Consultado: el 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://electrificadoracapital.com/producto/cable-fotovoltaico-16mm2_1
- [28] “Otece Material Eléctrico Industrial”. Consultado: el 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.otece.com.ec/producto/gabinete-metalico-pesado-60x40x20-cm-doble-fondo-beaucoup/>
- [29] “Electro Center Material Eléctrico”. Consultado: el 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://electrocenter.ec/producto/ls-b-0168-breaker-caja-moldeada-3p-100a-a1/>

8 ANEXOS

Anexo 1. Conectando equipo de medicion (Analizador de redes).



Anexo 2. Equipo de medición.



Anexo 3. Resumen de medición.


FLUKE ®	Archivo	Fecha/Hora del informe
	MEAS 3 -- Tarjeta SD	28/1/2026 16:03:03

Página2

Resumen de medición

Topología de medición	3Ø EN ESTRELLA
Modo de aplicación	Registrador
Primera medida	12/8/2025 7:46:17 907mseg
Ultima medida	11/9/2025 7:31:17 907mseg
Intervalo de grabación	0h 15m 0s 0mseg
Tensión nominal	230 V
Corriente nominal	300 A
Frecuencia nominal	60 Hz
Hora de inicio del archivo	12/8/2025 7:31:17 907mseg
Hora de fin del archivo	11/9/2025 7:31:17 907mseg
Duración	30d 0h 0m 0s 0mseg
Número de eventos	Normal: 262 Detalle: 261
Eventos descargados	No
Número de pantallas	0
Pantallas descargadas	No
Método de medición de potencia	Unificado
Tipo de cable	Copper
Espectro de armónicos	%H1
Modo THD	THD 40
Modo CosPhi / DPF	DPF

Anexo 4. Simulación de PVsyst.



PVsyst V7.4.6
VC0, Simulation date:
20/02/26 10:56
with V7.4.6

Project: SISTEMA HIBRIDO-2026
Variant: Nueva variante de simulación

Project summary

Geographical Site	Situation	Project settings
Hacienda Iscinche de Peñaherrera	Latitude -0.98 °S	Albedo 0.20
Ecuador	Longitude -78.65 °W	
	Altitude 2808 m	
	Time zone UTC-5	
Weather data		
Hacienda Yacupamba		
PVGIS api TMY		

System summary

Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings	User's needs
PV Field Orientation	Near Shadings	Unlimited load (grid)
Fixed plane	No Shadings	
Tilt/Azimuth 15 / 0 °		
System information	Inverters	
Nb. of modules 48 units	Nb. of units 1 unit	
Prnom total 28.08 kWp	Prnom total 30.0 kWac	
	Prnom ratio 0.936	

Results summary

Produced Energy	46802 kWh/year	Specific production	1667 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	89.23 %
-----------------	----------------	---------------------	-------------------	----------------	---------

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6
P50 - P90 evaluation	7
Single-line diagram	8
Cost of the system	9
CO ₂ Emission Balance	10

Anexo 5. Simulación de PVsyst.



PVsyst V7.4.6
 VC0, Simulation date:
 20/02/26 10:56
 with V7.4.6

Project: SISTEMA HIBRIDO-2026

Variant: Nueva variante de simulación

General parameters		
Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation	Sheds configuration	Models used
Orientation	No 3D scene defined	Transposition Perez
Fixed plane		Diffuse Imported
Tilt/Azimuth	15 / 0 °	Circumsolar separate
Horizon	Near Shadings	User's needs
Free Horizon	No Shadings	Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics			
PV module		Inverter	
Manufacturer	JA solar	Manufacturer	Huawei Technologies
Model	JAM78-S30-585-MR	Model	SUN2000-30KTL-M3-380V
(Custom parameters definition)		(Custom parameters definition)	
Unit Nom. Power	585 Wp	Unit Nom. Power	30.0 kWac
Number of PV modules	48 units	Number of inverters	1 unit
Nominal (STC)	28.08 kWp	Total power	30.0 kWac
Modules	3 string x 16 In series	Operating voltage	200-1000 V
At operating cond. (50°C)		Max. power (=>55°C)	33.0 kWac
Pmpp	25.62 kWp	Pnom ratio (DC:AC)	0.94
U mpp	644 V	Power sharing within this inverter	
I mpp	40 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	28 kWp	Total power	30 kWac
Total	48 modules	Max. power	33 kWac
Module area	134 m²	Number of inverters	1 unit
		Pnom ratio	0.94

Array losses								
Thermal Loss factor	DC wiring losses	Module Quality Loss						
Module temperature according to irradiance	Global array res.	268 mΩ	Loss Fraction					
Uc (const)	Loss Fraction	1.5 % at STC	-0.8 %					
Uv (wind)								
Module mismatch losses								
Loss Fraction								
IAM loss factor								
Incidence effect (IAM): Fresnel smooth glass, n = 1.526								
0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.998	0.981	0.948	0.862	0.776	0.636	0.403	0.000

Anexo 6. Simulación de PVsyst.



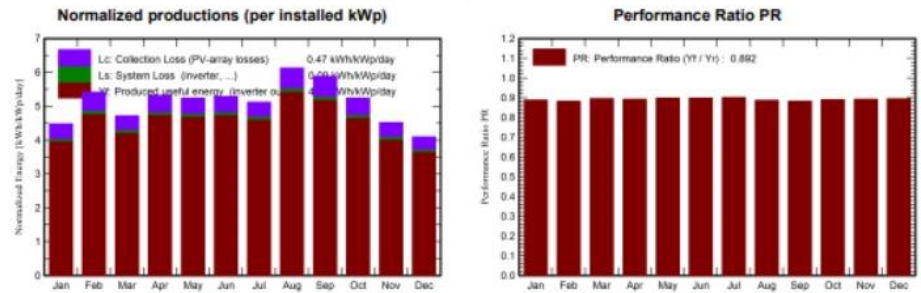
PVsyst V7.4.6
 VCO, Simulation date:
 20/02/26 10:56
 with V7.4.6

Project: SISTEMA HIBRIDO-2026

Variant: Nueva variante de simulación

Main results

System Production			
Produced Energy	46802 kWh/year	Specific production	1667 kWh/kWp/year
		Perf. Ratio PR	89.23 %
Economic evaluation			
Investment		Yearly cost	LCOE
Global	10.038.00 USD	Annuities	0.00 USD/yr
Specific	0.36 USD/Wp	Run. costs	428.40 USD/yr
		Payback period	Unprofitable
		Energy cost	0.01 USD/kWh



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	157.4	59.58	11.96	138.9	133.6	3531	3464	0.888
February	165.0	56.04	12.13	151.6	146.8	3833	3762	0.883
March	149.4	72.26	12.32	146.2	142.3	3751	3681	0.897
April	153.9	60.69	12.56	159.6	156.0	4078	4005	0.894
May	149.1	56.54	11.21	162.4	158.8	4175	4099	0.899
June	142.5	54.18	11.15	158.7	155.1	4077	4003	0.898
July	143.8	53.73	10.41	158.8	155.1	4096	4022	0.902
August	179.0	53.97	10.40	190.1	186.0	4823	4737	0.887
September	175.9	56.13	11.80	176.6	172.2	4460	4380	0.883
October	172.1	63.17	11.58	162.4	158.0	4142	4065	0.891
November	150.1	65.40	12.35	135.5	131.1	3462	3396	0.893
December	144.4	63.29	11.40	127.0	122.2	3252	3190	0.895
Year	1882.4	714.97	11.60	1867.9	1816.9	47679	46802	0.892

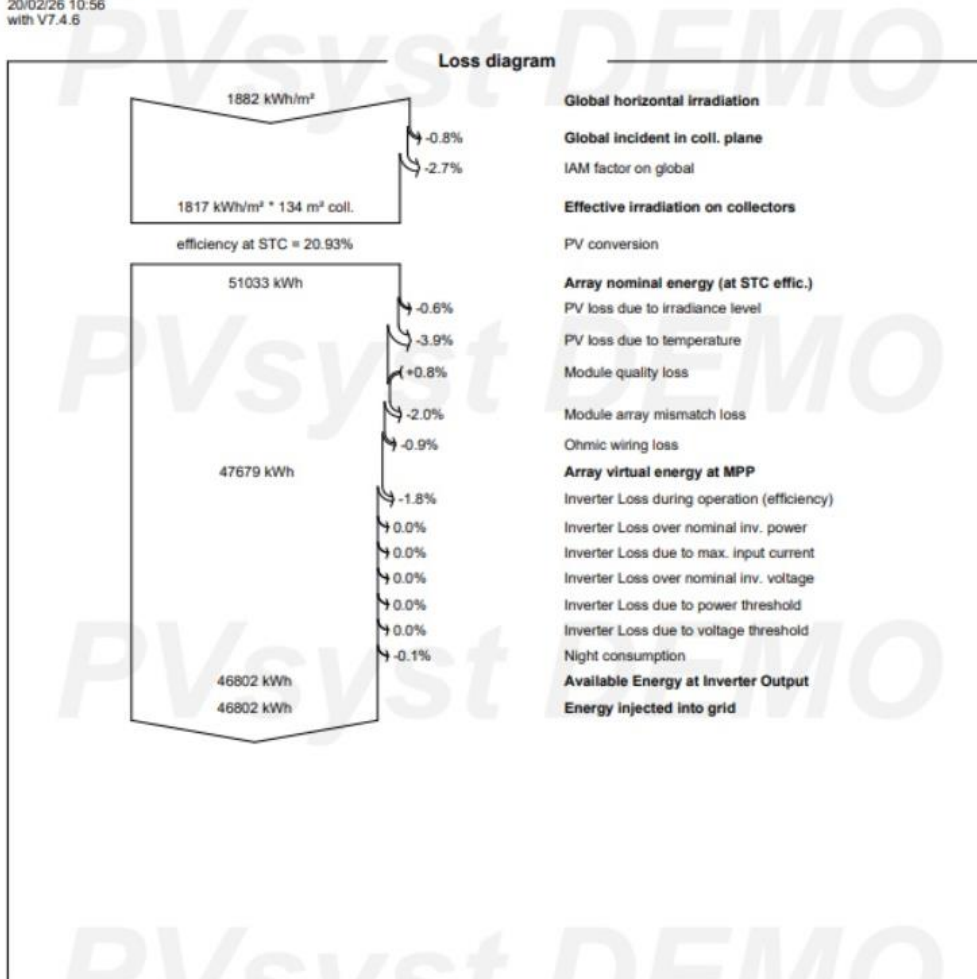
Anexo 7. Simulación de PVsyst.



PVsyst V7.4.6
 VC0, Simulation date:
 20/02/26 10:56
 with V7.4.6

Project: SISTEMA HIBRIDO-2026

Variant: Nueva variante de simulación



Anexo 8. Simulación de PVsyst.



PVsyst V7.4.6
 VCO, Simulation date:
 20/02/26 10:56
 with V7.4.6

Project: SISTEMA HIBRIDO-2026

Variant: Nueva variante de simulación

P50 - P90 evaluation

Weather data

Source	PVGIS api TMY
Kind	TMY, multi-year
Year-to-year variability(Variance)	6.8 %
Specified Deviation	
Climate change	0.0 %

Simulation and parameters uncertainties

PV module modelling/parameters	1.0 %
Inverter efficiency uncertainty	0.5 %
Soiling and mismatch uncertainties	1.0 %
Degradation uncertainty	1.0 %

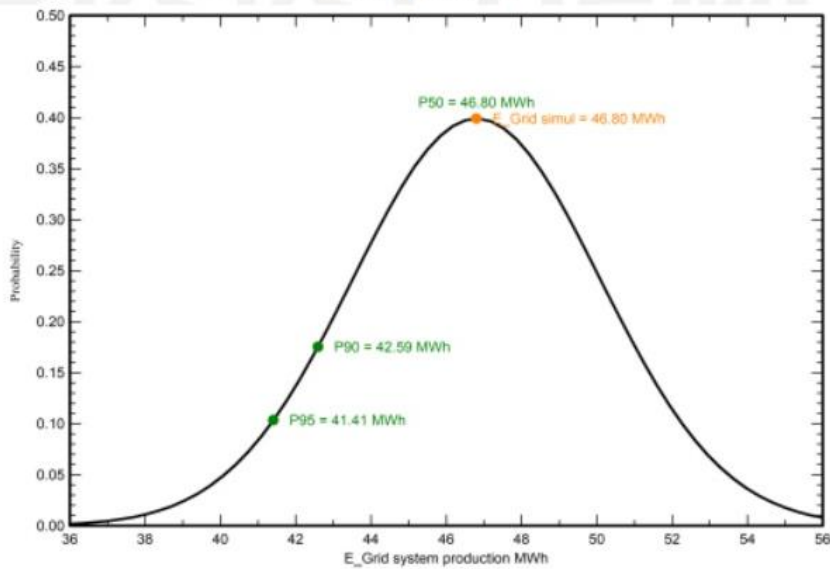
Global variability (weather data + system)

Variability (Quadratic sum)	7.0 %
-----------------------------	-------

Annual production probability

Variability	3.28 MWh
P50	46.80 MWh
P90	42.59 MWh
P95	41.41 MWh

Probability distribution



Anexo 9. Van y el Tir.

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

2														
3	OPEX	\$600.53	VAN		3662,867/907	costo de recuperacion el proyect		ENERGIA REAL APROVECHAL		costo beneficio del proyect				
4	r	Wacc	0,13283	TIR		15%	CAPEX	12968,516	EFV	43221,235	EAP	33382,255		
5	n	Vida util del proyecto	20				Beneficio	1503,0466	Factor de aprovechamiento	0,7723577	Tarifa	0,061		
6	I0	Inversión inicial (CAPEX)	12968,516				CR	0,6287528	EAP	33382,255	OPEX	\$600,53		
7											Consumo	\$43,94		
8											Beneficio neto	\$1503,05		
9	$FCN_t = (E_t \times Tarifa_{energia}) - OPEX_t$													
10	0	43221,23465	0,061	720,28	23,31976193	\$600,53	\$2,079,90	\$2,104,64	1	2104,6384	2104,638426	\$2,103,92		
11	1	43197,87651	0,061	720,28	23,3074336	\$600,53	\$2,078,49	\$2,133,21	113293	1655,5972	2103,208269	\$1,857,27		
12	2	43197,87651	0,061	720,28	23,30736566	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	1283303809	1638,8958	2103,201173	\$1,639,53		
13	3	43197,87671	0,061	720,28	23,30736577	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	1453765054	1446,727	2103,201165	\$1,447,31		
14	4	43197,87655	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	1648888666	1277,091	2103,201181	\$1,277,54	2104,638428 1467,47	
15	5	43197,87664	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	1865622231	1127,3457	2103,201181	\$1,127,85		
16	6	43197,87671	0,061	720,28	23,30736577	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	2,10432032	995,15975	2103,201165	\$995,62		
17	7	43197,87671	0,061	720,28	23,30736577	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	2,394301015	878,4714	2103,201165	\$878,90		
18	8	43197,87671	0,061	720,28	23,30736577	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	2,712176403	775,46822	2103,201165	\$775,85		
19	9	43197,87671	0,061	720,28	23,30736577	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	3,072434794	684,53892	2103,201165	\$684,89		
20	10	43197,87668	0,061	720,28	23,30736575	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	3,490546308	604,27329	2103,201183	\$604,59		
21	11	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	3,942867274	533,41922	2103,201181	\$533,71		
22	12	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	4,446899334	470,97314	2103,201181	\$471,14		
23	13	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	5,009895531	415,6609	2103,201181	\$415,90		
24	14	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	5,72002695	366,92258	2103,201181	\$367,14		
25	15	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	6,493384568	323,89906	2103,201181	\$324,09		
26	16	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	7,35590094	285,92027	2103,201181	\$286,09		
27	17	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	8,332365949	252,29469	2103,201181	\$252,55		
28	18	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	9,439895966	222,80014	2103,201181	\$222,94		
29	19	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	10,69375168	196,67571	2103,201181	\$196,80		
30	20	43197,87665	0,061	720,28	23,30736573	\$600,53	\$2,078,48	\$2,103,20	12,1142026	173,6145	2103,201181	\$173,72		
31			Calculo del VAN				SUMA		36631,384	44168,66988	36637,44			
32			FI		16931,80391									
33			CAPEX		12968,516									
34			VAN		3662,867/907									

Anexo 10. Costo nivelado de Energía.

1	LCOE (Costo Nivelado de Energía)						
2							
3	Entradas						
4	CAPEX total (USD)	\$12,968.52					
5	OPEX anual total (USD/año)	\$600.53					
6	Energía año 1 (kWh/año)						
7	Degradación anual FV	0.5000	https://www.guanjitech.com/ia-solar/?gad_source=1&gad_campaignid=22306279676&gbraid=0AAAAA/				
8	Tasa de descuento (WAC)	0,1328					
9	Vida del proyecto (años)	20					
10	Reemplazo inversor (año)	10					
11	Costo reemplazo inversor	176					
12							
13							
14	Año	Energía (kWh)	OPEX (USD)	Reemplazo (USD)	Factor descuento	Costo descontado (USD)	Energía descontada (kWh)
18	3	43197,87671	\$600.53	\$176.00	0,6879	\$534,15	29,714,48
19	4	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,6072	\$471,52	26,230,31
20	5	43197,87664	\$600.53	\$176.00	0,5360	\$416,23	23,154,68
21	6	43197,87671	\$600.53	\$176.00	0,4732	\$367,42	20,439,67
22	7	43197,87671	\$600.53	\$176.00	0,4177	\$324,34	18,043,02
23	8	43197,87671	\$600.53	\$176.00	0,3687	\$286,31	15,927,38
24	9	43197,87671	\$600.53	\$176.00	0,3255	\$252,74	14,059,82
25	10	43197,87668	\$600.53	\$176.00	0,2873	\$223,11	12,411,23
26	11	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,2536	\$196,94	10,955,96
27	12	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,2239	\$173,85	9,671,31
28	13	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,1976	\$153,47	8,537,30
29	14	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,1745	\$135,47	7,536,26
30	15	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,1540	\$119,59	6,652,60
31	16	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,1359	\$105,57	0,00
32	17	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,1200	\$93,19	0,00
33	18	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,1059	\$82,26	0,00
34	19	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,0935	\$72,62	0,00
35	20	43197,87665	\$600.53	\$176.00	0,0825	\$64,10	0,00
36							
37	NPV Costos (USD)						\$18,331,97
38	NPV Energía (kWh)						318,349,55
39	LCOE						\$0,0576
40							

Anexo 11. Irradiación y energía pronosticada.

	Irradiacion_anual_kWh_m2	Energia_DC_anual_kWh	Energia_AC_anual_kWh	HS	Tamb_C_promedio
	1802,896037	48563,18522	43221,23485	4,939441197	11,64416667
	1801,926235	48537,08281	43198,00370	4,936784204	11,64416667
	1801,920924	48536,9399	43197,87651	4,936769656	11,64416667
	1801,920933	48536,94013	43197,87671	4,93676968	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87664	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87671	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87671	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87668	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87675	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87668	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
	1801,92093	48536,94013	43197,87665	4,936769672	11,64416667
Promedio	1801,969951				

Anexo 12. Pliego tarifario.

PERIODO: ENERO - DICIEMBRE

EMPRESAS ELÉCTRICAS:

AMBATO - AZOGUES - CNEL BOLÍVAR - CENTROSUR - COTOPAXI - NORTE - RIOBAMBA - SUR

CARGOS TARIFARIOS ÚNICOS

RANGO DE CONSUMO	DEMANDA (USD/kW-mes)	ENERGÍA (USD/kWh)	COMERCIALIZACIÓN (USD/Consumidor)
NIVEL VOLTAJE	MEDIO VOLTAJE CON DEMANDA		
	COMERCIALES		1,414
	4,790	0,095	
	INDUSTRIALES		
	4,790	0,093	
	E. OFICIALES, ESC. DEPORTIVOS SERVICIO COMUNITARIO Y ABONADOS ESPECIALES		
	4,790	0,071	
	BOMBEO AGUA		
	4,790	0,061	
NIVEL VOLTAJE	MEDIO VOLTAJE CON DEMANDA HORARIA		
	COMERCIALES		1,414
08:00 hasta 22:00 horas	4,576	0,095	
22:00 hasta 08:00 horas		0,077	
	E. OFICIALES, ESC. DEPORTIVOS SERVICIO COMUNITARIO Y ABONADOS ESPECIALES		
08h00 hasta 22h00	4,576	0,071	
22h00 hasta 08h00		0,059	
	BOMBEO AGUA		