



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica

**Diseño de un sistema fotovoltaico off-grid para el
suministro de energía eléctrica de una vivienda en la
comunidad Minacachihuancaray, Apurímac**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista

AUTOR

Andersson CONDEZO PEREZ

Macedonio PECEROS MALLMA

ASESOR

Mg. Delfin Genaro SUSANIBAR CELEDONIO

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Condezo, A. & Peceros, M. (2026). *Diseño de un sistema fotovoltaico off-grid para el suministro de energía eléctrica de una vivienda en la comunidad Minacachihuancaray, Apurímac*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Macedonio Peceros Mallma Andersson Condezo Perez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75008379 71302143
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Delfin Genaro Susanibar Celedonio
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	16010188
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1586-8761
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Fernando Jose Oyanguren Ramirez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07566297
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Victor Edmundo Alva Saldaña
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07299248
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Edy Alberto Roman Ccorahua
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06767696
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.02.6 Tecnología limpia y medio ambiente
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	Lugar: Comunidad Minacachihuancaray Distrito: San Antonio de Cachi Provincia: Andahuaylas Departamento: Apurímac País: Perú Latitud: -13.656 Longitud: -73.438
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2025
URL de disciplinas OCDE	Energía, combustibles https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03 Ingeniería eléctrica, Ingeniería electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN

TESIS

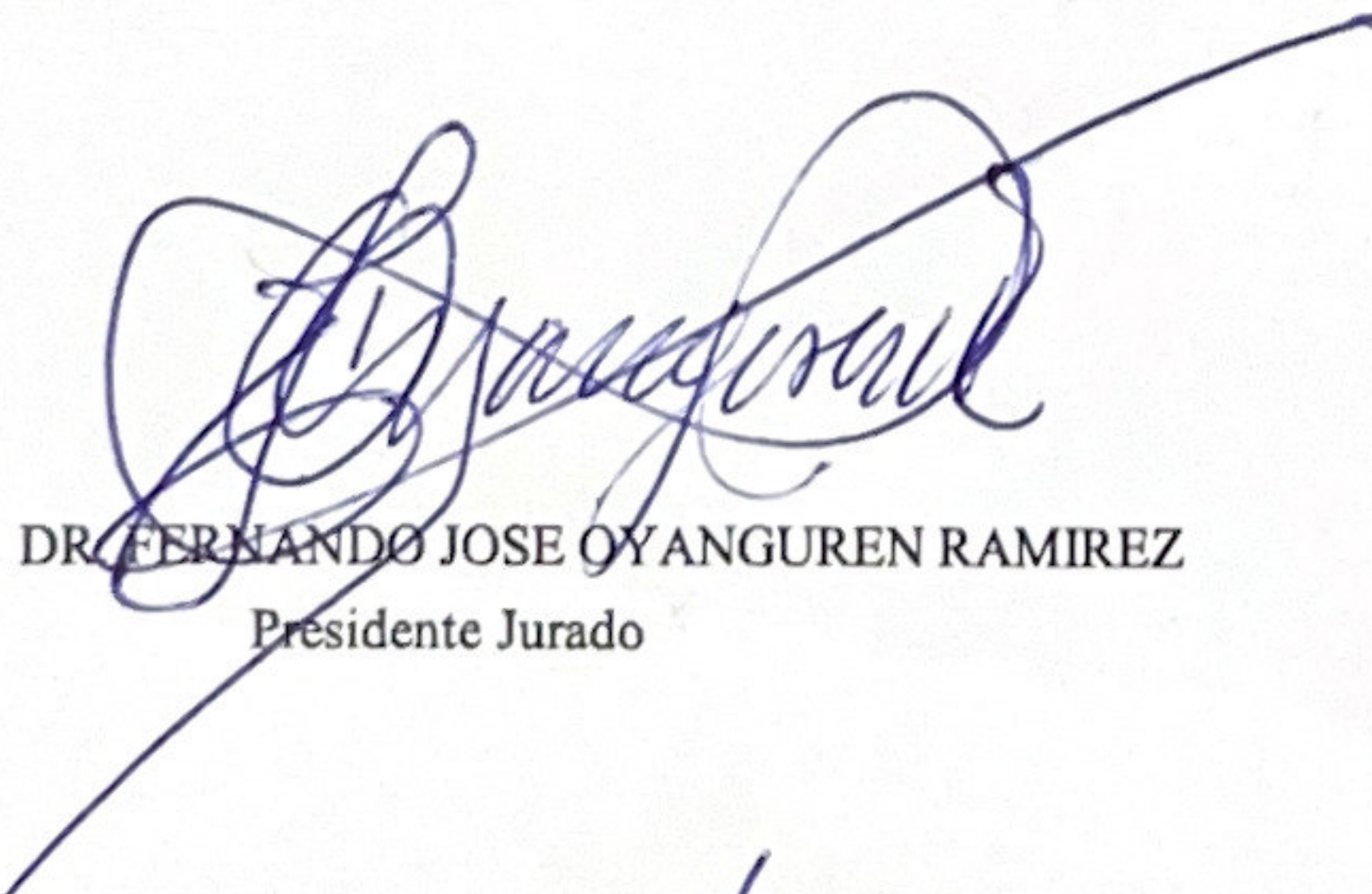
ACTA N°21/FIEE-PPP/2026

Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 19 de marzo del 2026, como presidente de Jurado el **DR. FERNANDO JOSE OYANGUREN RAMIREZ**, integrado por el Miembro de Jurado el **ING. VICTOR EDMUNDO ALVA SALDAÑA**, el Miembro de Jurado el **MG. EDY ALBERTO ROMAN CCORAHUA** y Miembro Asesor el **ING. DELFIN GENARO SUSANIBAR CELEDONIO**.

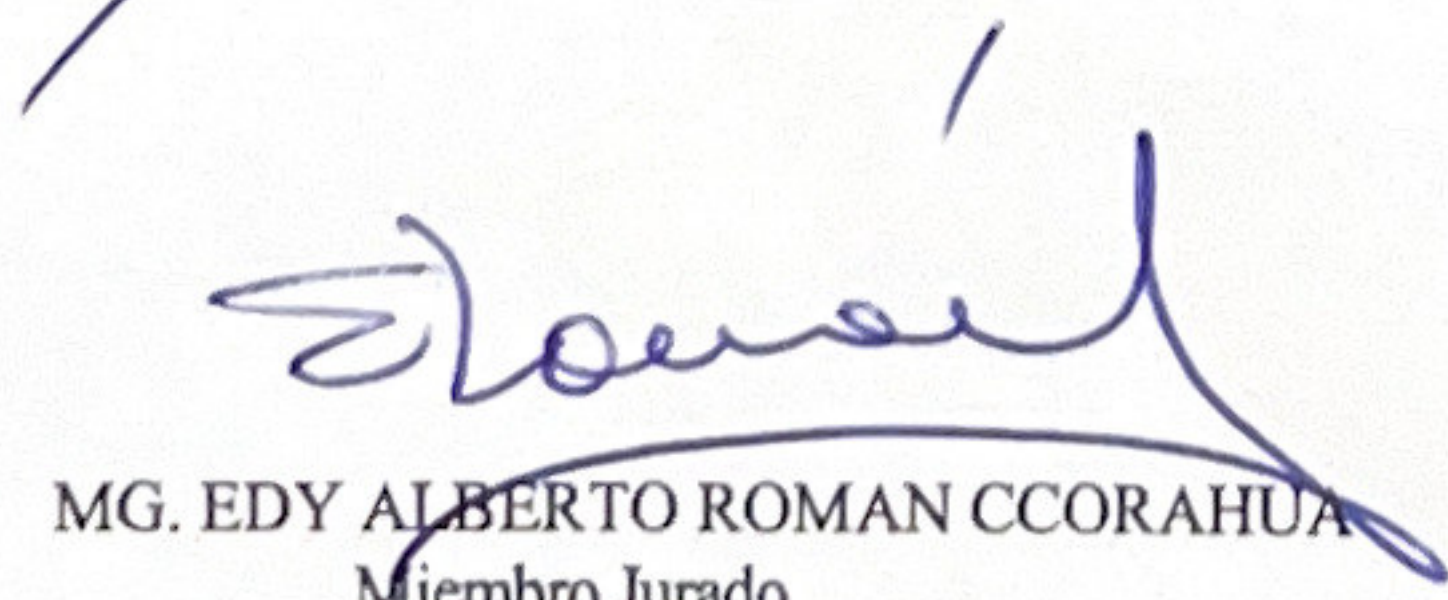
Después de escuchar la Sustentación Presencial de la Tesis del Bachiller **MACEDONIO PECEROS MALLMA** con código 19190073 y del Bachiller **ANDERSSON CONDEZO PEREZ** con código 19190241 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista sustentaron la Tesis titulada **DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA VIVIENDA EN LA COMUNIDAD MINACACHIHUANCARAY, APURÍMAC**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 15 (Quince).

Ciudad Universitaria, 19 de marzo del 2026


DR. FERNANDO JOSE OYANGUREN RAMIREZ
Presidente Jurado


ING. VICTOR EDMUNDO ALVA SALDAÑA
Miembro Jurado


MG. EDY ALBERTO ROMAN CCORAHUA
Miembro Jurado


ING. DELFIN GENARO SUSANIBAR CELEDONIO
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo , **DELFIN GENARO SUSANIBAR CELEDONIO** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°22/FIEE-PPP/2026 de la Tesis titulada **DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA VIVIENDA EN LA COMUNIDAD MINACACHIHUANCARAY, APURÍMAC**, presentado por el bachiller MACEDONIO PECEROS MALLMA y por el bachiller ANDERSSON CONDEZO PEREZ, para optar al título profesional de Ingeniero Electricista. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 10% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Electricista.

Lima, 19 de Marzo del 2026

Firma del Asesor

DNI: 16010188

Nombres y apellidos del asesor:

DELFIN GENARO SUSANIBAR CELEDONIO

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres, Vidalina Pérez y Cevero Condezo, por su amor incondicional, sus consejos y su guía en mi formación personal y profesional. A mi querido hermano, Wency Raúl, por su apoyo y motivación para seguir adelante. De manera especial, a mi Liz Angélica, por su amor, paciencia y apoyo durante este proceso, brindándome la fortaleza y motivación para culminar este trabajo. Dedico este trabajo a mis padres, Macedonio Peceros y Gloria Mallma, por su amor, esfuerzo y sacrificio, pilares fundamentales en mi formación personal y profesional. A mis hermanos, Henry, Tedy y Fabricio, por su compañía y motivación a lo largo de mi vida. De manera especial, a mi hermano Washington, quien, aunque ya no está físicamente conmigo, permanece siempre en mi corazón y en cada logro alcanzado

AGRADECIMIENTO

Agradecemos, en primer lugar, a Dios por brindarnos la fortaleza y perseverancia necesarias para alcanzar este objetivo. Asimismo, expresamos nuestro sincero agradecimiento a los docentes y asesores, por su orientación, conocimientos y valiosas recomendaciones durante el desarrollo de la presente investigación. Finalmente, a nuestros padres y familiares, por su apoyo, paciencia y motivación constante a lo largo del desarrollo de este trabajo. Gracias a su comprensión y confianza hemos podido alcanzar esta meta académica.

RESUMEN

El acceso a la energía eléctrica constituye un factor fundamental para el desarrollo social, económico y productivo de las comunidades rurales. En el Perú, aún persisten brechas de electrificación en zonas altoandinas donde la extensión de la red convencional resulta técnica y económicamente compleja. La comunidad de Minacachihuancaray, ubicada en el distrito de San Antonio de Cachi, Apurímac, presenta limitaciones en el suministro eléctrico, lo que restringe las actividades domésticas y el aprovechamiento de servicios básicos. Frente a esta problemática, la presente investigación tuvo como objetivo diseñar un sistema fotovoltaico off-grid para abastecer la demanda energética de una vivienda representativa de la zona, evaluando su sostenibilidad técnica y económica. El estudio adoptó un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo y no experimental, basado en el cálculo de la demanda energética, el análisis del recurso solar promedio de $5.15 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$ y el dimensionamiento de los componentes del sistema. Los resultados determinaron una demanda anual de 2,948 kWh y una generación estimada de 8,032 kWh/año, alcanzando una fracción solar a 1. El análisis económico mostró una inversión inicial de S/ 11,970.56, un periodo de recuperación de aproximadamente 6.4 años y un retorno de inversión del 15.7 % anual. Se concluye que el sistema propuesto es técnicamente viable y económicamente sostenible para la electrificación rural.

Palabras clave: sistema fotovoltaico off-grid, demanda anual, sostenibilidad energética, análisis económico, periodo de recuperación, retorno de inversión.

ABSTRACT

Access to electricity is a fundamental factor for the social, economic, and productive development of rural communities. In Peru, there are still gaps in electrification in high Andean areas where extending the conventional grid is technically and economically complex. The community of Minacachihuancaray, located in the district of San Antonio de Cachi, Apurímac, has limited electricity supply, which restricts domestic activities and the use of basic services. In response to this problem, the objective of this research was to design an off-grid photovoltaic system to supply the energy demand of a representative home in the area, evaluating its technical and economic sustainability. The study adopted a quantitative, descriptive, and non-experimental approach based on the calculation of energy demand, the analysis of the average solar resource of 5.15 kWh/m²·day, and the sizing of the system components. The results determined an annual demand of 2,948 kWh and an estimated generation of 8,032 kWh/year, reaching a solar fraction of 1. The economic analysis showed an initial investment of S/ 11,970.56, a payback period of approximately 6.4 years, and an annual return on investment of 15.7%. It is concluded that the proposed system is technically feasible and economically sustainable for rural electrification.

Keywords: off-grid photovoltaic system, annual demand, energy sustainability, economic analysis, payback period, return on investment.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE TABLAS	xi
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
I.1 Planteamiento del problema	2
I.1.1 Problema general	5
I.1.2 Problemas específicos	5
I.2 Objetivos	6
I.2.1 Objetivo general	6
I.2.2 Objetivos específicos	6
I.3 Importancia y alcance de la investigación	6
I.4 Limitaciones de la investigación	7
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	9
II.1 Marco teórico	9
II.1.1 Energía Solar fotovoltaica	9
II.1.2 Sistemas fotovoltaicos off-grid:	10
II.1.3 Factores climáticos y de radiación solar	12
II.1.4 Uso de software de simulación para optimización del sistema	14

II.1.5	Impacto de la Energía Solar en Comunidades	15
II.2	Antecedentes del estudio	18
II.2.1	Antecedentes internacionales	18
II.2.2	Antecedentes nacionales	20
II.3	Bases teóricas	24
II.3.1	Legislación y Políticas Energéticas en el Perú	24
II.3.2	Normativas nacionales sobre energías renovables y electrificación rural	24
II.3.3	Programas gubernamentales de electrificación con energía solar	25
II.3.4	Normas Técnicas para la Implementación de Sistemas Fotovoltaicos	26
II.3.5	Regulaciones sobre la instalación y operación de sistemas fotovoltaicos autónomos	26
II.3.6	Calidad estándar y certificación de equipos fotovoltaicos en el país	27
II.3.7	Regulaciones sobre la instalación y operación de sistemas fotovoltaicos autónomos	29
II.3.8	Estándares de calidad y certificación de equipos fotovoltaicos en el país	29
II.4	Definición de términos	30
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES		34
III.1	Hipótesis	34
III.1.1	Hipótesis General	34
III.1.2	Hipótesis Específicas	34
III.2	Variables	34
III.2.1	Variable independiente	34
III.2.2	Variable dependiente	34
III.3	Operacionalización de las variables	35

CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS	36
IV.1 Área de estudio	36
IV.2 Diseño de investigación	37
IV.3 Población y Muestra	38
IV.3.1 Población	38
IV.3.2 Muestra	38
IV.4 Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información	38
IV.4.1 Recurso solar en zona de trabajo	38
IV.4.2 Demanda energética de viviendas	40
IV.4.3 Proveedores y comparativa de tecnologías de los principales componentes fotovoltaicos.	41
IV.5 Diseño de un sistema fotovoltaico off grid	44
IV.5.1 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico mediante cálculos matemáticos	44
IV.6 Análisis comparativo entre energía convencional y energía fotovoltaica en zonas rurales	58
IV.7 Diagrama unifilar del sistema Fotovoltaico off grid y dimensionamiento de conductores	61
IV.8 Plano arquitectónico y eléctrico de vivienda	62
IV.9 Software para el monitoreo y gestión inteligente	64
IV.9.1 Arquitectura del sistema de monitoreo	64
IV.9.2 Adquisición de datos	65
IV.9.3 Sistema de procesamiento de datos	66
IV.9.4 Sistema de almacenamiento de datos	66
IV.9.5 Sistema de visualización de datos	67
IV.9.6 Conexión con la tablet de monitoreo	67
IV.10 Análisis económico	67

IV.10.1	Costo de implementación del sistema Fotovoltaico off-grid	67
IV.10.2	Análisis de costos mantenimiento	69
IV.10.3	Cálculo de ahorro y rentabilidad	70
CAPÍTULO V: RESULTADOS		73
V.1	Resultado del dimensionamiento del sistema Fotovoltaico Off-Grid	73
V.2	Marco de ahorro anual	74
V.3	Periodo de recuperación de la inversión (Payback)	75
V.4	Retorno de la inversión (ROI)	75
CAPÍTULO VI: DISCUSIONES		77
VI.1	Discusión del sobredimensionamiento y su impacto económico	77
VI.2	Discusión de la vinculación con el potencial solar regional	77
VI.3	Discusión de la viabilidad económica del sistema	78
VI.3.1	Marco de ahorro anual	79
VI.3.2	Periodo de recuperación de la inversión (Payback)	79
VI.3.3	Retorno de la inversión (ROI)	79
VI.4	Sostenibilidad del sistema fotovoltaico	80
VI.5	Impacto económico, ambiental y social del sistema fotovoltaico	81
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES		84
CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES		86
CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA		88
CAPÍTULO X: ANEXOS		91
Anexo 1: Matriz de consistencia		91

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación geográfica de la comunidad Cachihuancaray provincia Andahuaylas-Apurímac.	36
Figura 2 Área y perímetro de vivienda unifamiliar en la comunidad de Minacachihuancaray.	37
Figura 3 Características técnicas del panel fotovoltaico Monocristalino	45
Figura 4 Características técnicas del panel fotovoltaico monocristalino	48
Figura 5 Carta solar de la comunidad de Minacachihuancaray.	53
Figura 6 Irradiación solar Anual.	54
Figura 7 Consumo energético de equipos.	54
Figura 8 Distribución de Consumos diarios para el año.	55
Figura 9 Inclinación óptima de panel fotovoltaico.	55
Figura 10 Resultados de simulación en PVsyst.	56
Figura 11 Gráfica de proporción de rendimiento vs fracción solar.	56
Figura 12 Gráfica de producción normalizada y potencia nominal.	57
Figura 13 Unifilar del sistema Fotovoltaico off-grid.	61
Figura 14 Selección de conductores.	62
Figura 15 Arquitectura de vivienda unifamiliar.	62
Figura 16 Instalaciones eléctricas de vivienda unifamiliar.	63
Figura 17 Diagrama unifilar de TG.	63
Figura 18 Dimensionamiento para selección de conductores.	64
Figura 19 Diagrama de la arquitectura del sistema de monitoreo.	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características geográficas de la vivienda unifamiliar	37
Tabla 2 Recurso solar en la comunidad de Cachihuancaray	38
Tabla 3 Datos climatológicos de la comunidad Minacachihuancaray	39
Tabla 4 Datos climatológicos obtenidos de NREL	39
Tabla 5 Consumo de energético por equipos de la vivienda	40
Tabla 6 Cuadro comparativo de paneles solares	41
Tabla 7 Cuadro comparativo de baterías	42
Tabla 8 Cuadro comparativo de controladores	42
Tabla 9 Cuadro comparativo de inversores	43
Tabla 10 Energía Convencional vs Energía Fotovoltaica (Zona Rural)	58
Tabla 11 Características Raspberry Pi 4 Model B	66
Tabla 12 Presupuesto del sistema Fotovoltaico Off-Grid	68
Tabla 13 Tarifario eléctrico en Andahuaylas-Apurímac	71
Tabla 14 Especificaciones técnicas de sistema fotovoltaico	73
Tabla 15 Consumo energético de vivienda unifamiliar	73
Tabla 16 Comparación entre generación, consumo y energía no aprovechada	78
Tabla 17 Indicadores económicos del sistema fotovoltaico off-grid	80
Tabla 18 Impacto ambiental del sistema fotovoltaico	82
Tabla 19 Impacto social del sistema fotovoltaico	83

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El acceso a la energía eléctrica constituye un factor fundamental para el desarrollo social, económico y productivo de las poblaciones, al permitir la mejora de las condiciones de vida, el acceso a servicios básicos y la reducción de brechas de desigualdad. En este contexto, la electrificación se reconoce como un elemento clave para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular aquellos vinculados a la erradicación de la pobreza, la educación de calidad y el desarrollo de infraestructuras resilientes. Sin embargo, pese a los avances tecnológicos y a los esfuerzos institucionales realizados en las últimas décadas, aún persisten comunidades que no cuentan con un suministro eléctrico adecuado, especialmente en zonas rurales de difícil acceso.

En países en desarrollo como el Perú, la expansión de la red eléctrica convencional hacia áreas rurales dispersas enfrenta importantes limitaciones técnicas, geográficas y económicas. La complejidad del terreno, la baja densidad poblacional y los elevados costos de inversión dificultan la implementación de infraestructuras tradicionales, lo que ha motivado la búsqueda de soluciones energéticas alternativas. En este escenario, los sistemas de generación basados en fuentes renovables, particularmente la energía solar fotovoltaica, se presentan como una opción viable para atender la demanda energética de viviendas rurales aisladas, debido a su modularidad, flexibilidad y bajo impacto ambiental.

La generación fotovoltaica off-grid permite el suministro de energía eléctrica de manera autónoma, sin dependencia de la red pública, lo que resulta especialmente adecuado para comunidades que no cuentan con acceso a infraestructura eléctrica convencional. Además de aprovechar un

recurso abundante como la radiación solar, este tipo de sistemas contribuye a la reducción del uso de combustibles fósiles, disminuye las emisiones contaminantes y promueve un modelo energético más sostenible en el largo plazo. No obstante, para garantizar su implementación efectiva, es necesario realizar un análisis técnico y económico que permita evaluar su desempeño, confiabilidad y sostenibilidad bajo condiciones reales de operación.

En este marco, la presente investigación se orienta al diseño y evaluación de un sistema de generación fotovoltaica off-grid destinado al suministro de energía eléctrica en una vivienda de la comunidad de Minacachihuancaray, ubicada en la región Apurímac. El estudio aborda aspectos técnicos relacionados con el dimensionamiento del sistema, así como el análisis económico de su viabilidad y sostenibilidad, considerando las condiciones climáticas, el perfil de consumo y el contexto rural de la zona de estudio.

I.1 Planteamiento del problema

Diversos informes recientes de organismos internacionales como la ONU, Banco Mundial e IEA señalan que cerca del 8% de la población mundial, equivalente a alrededor de 666 millones de personas, aún no cuenta con acceso a la electricidad. Este panorama representa un retroceso en los avances logrados durante la última década, pues en 2022 el número de personas sin acceso aumentó por primera vez en más de diez años. Este retroceso se debe a que el crecimiento poblacional superó el ritmo de nuevas conexiones, situación agravada por la crisis energética global y otros factores socioeconómicos.

Según el informe Tracking SDG 7 (2025), África subsahariana concentra cerca del 80 % de la población mundial sin acceso a electricidad, y bajo las tendencias actuales se proyecta que en 2030 aproximadamente 660 millones de personas seguirán sin electricidad, la mayoría en dicha región.

Según Yépez-García, Johnson y Andrés (2010), la región de América Latina y el Caribe presenta en conjunto una alta cobertura eléctrica, la desigualdad interna es marcada. Por ejemplo, países como Uruguay, Chile y Brasil muestran tasas de acceso casi universales, mientras que otros, como

Haití o Guatemala, aún evidencian rezagos significativos. En efecto, en 2008 la cobertura nacional en Brasil alcanzaba 98 %, Chile 99 %, Uruguay 99 %, mientras que en Haití la tasa era de apenas 39 % y en Guatemala cerca de 81 %. La mayor parte de la población sin electrificación reside en zonas rurales dispersas, donde las dificultades geográficas y económicas dificultan el despliegue de infraestructura convencional — una situación reconocida por organizaciones regionales de energía.

Perú ha avanzado de manera importante en la expansión del servicio eléctrico, pero aún enfrenta una brecha considerable, sobre todo en el ámbito rural. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), en 2021, cerca del 5.9% de los hogares —más de 1.9 millones de personas— no contaba con acceso a energía eléctrica proveniente de una red pública.

Este déficit presenta una marcada desigualdad territorial: mientras las zonas urbanas alcanzan coberturas cercanas al 97%, en las áreas rurales apenas alrededor del 82.6% de los hogares dispone de electrificación. Las regiones de la sierra y la selva presentan los mayores niveles de rezago. Frente a ello, el Gobierno viene impulsando programas de electrificación rural que combinan la extensión de la red convencional con soluciones energéticas renovables, especialmente sistemas solares fotovoltaicos, para llegar a comunidades de difícil acceso.

Si bien no existe un dato oficial actualizado para 2024 sobre el acceso eléctrico en la provincia de Andahuaylas, los registros disponibles permiten realizar una aproximación. De acuerdo con el INEI, en 2019, aproximadamente el 95% de los hogares en Apurímac contaba con energía eléctrica, lo que implica un déficit cercano al 5%. Es probable que la situación en la provincia de Andahuaylas sea similar o incluso ligeramente mayor, debido a su marcada composición rural.

Históricamente, el acceso ha mostrado mejoras importantes: por ejemplo, en 2007 alrededor del 34.4% de los hogares de la provincia no disponía de electricidad, lo que evidencia avances notorios. No obstante, las zonas más alejadas continúan siendo las más difíciles de electrificar y mantienen brechas superiores al promedio departamental.

En conjunto, la situación muestra que, aunque Andahuaylas ha logrado avances significativos en materia de electrificación, aún existe una franja de habitantes (principalmente rurales) que permanece sin acceso al servicio, reflejando la persistencia de desafíos estructurales que limitan el desarrollo social y económico de estas comunidades.

En las viviendas que no cuentan con energía eléctrica en la comunidad de Mina Cachihuancaray, la falta de iluminación y de puntos de conexión para equipos electrodomésticos constituye un problema central que limita profundamente la vida diaria de las familias. Al no disponer de un suministro eléctrico, los hogares no pueden realizar tareas básicas como cargar dispositivos, conservar alimentos o utilizar herramientas que faciliten el trabajo doméstico. Durante la noche, la escasa iluminación obliga a las familias a depender de mecheros, linternas o lámparas improvisadas, lo que reduce la seguridad, incrementa riesgos y restringe el desarrollo de actividades después del anochecer. Como resultado, las labores productivas y domésticas suelen detenerse muy temprano, afectando el bienestar, la productividad y las oportunidades de mejora en la calidad de vida de la comunidad.

En Minacachi Huancaray, la falta de suministro eléctrico se debe a múltiples factores estructurales y técnicos. La zona no cuenta con cobertura de la red nacional debido a la gran distancia respecto al punto de suministro más cercano, lo que incrementa considerablemente los costos y la complejidad de la extensión de líneas. Según la revisión del Plan de Electrificación Rural, la comunidad se encuentra proyectada recién para una tercera o cuarta etapa de intervención, lo que implica varios años de espera antes de su integración a la red. A ello se suman las limitaciones económicas tanto de la población como de las instituciones locales, que impiden financiar sistemas de generación convencional o los estudios necesarios para líneas de transmisión. Además, la dispersión geográfica de las viviendas y la baja densidad poblacional reducen el atractivo de la zona para inversionistas y operadores eléctricos, retrasando aún más cualquier iniciativa de electrificación. Todo ello conforma un conjunto de barreras que dificultan y postergan de manera significativa el acceso al suministro eléctrico en la localidad.

La ausencia de suministro eléctrico en Minacachi Huancaray genera impactos directos en el desarrollo local y en las condiciones de vida de la población. La falta de energía limita la implementación de servicios básicos como el acceso a agua segura mediante bombeo, la conservación de alimentos y el funcionamiento de equipamiento sanitario. Asimismo, la zona presenta menor nivel de seguridad, ya que la carencia de iluminación pública y doméstica incrementa la vulnerabilidad durante la noche. La calidad de vida se ve afectada por la imposibilidad de utilizar equipos que faciliten las actividades del hogar, la educación y el trabajo. En el ámbito educativo, las escuelas operan con restricciones para el uso de materiales audiovisuales, computadoras o iluminación adecuada, lo que reduce la continuidad y eficiencia del proceso de aprendizaje. Estas limitaciones, en conjunto, dificultan el progreso social y económico de la comunidad y mantienen a la población en condiciones de menor competitividad y acceso a oportunidades.

Para el suministro eléctrico en la zona existen medios alternativos viables y sostenibles para enfrentar la falta de suministro eléctrico convencional en la zona. Entre ellas, la generación solar fotovoltaica se presenta como una alternativa altamente favorable, especialmente para la comunidad de Mina Cachihuancaray. Esta localidad posee condiciones climáticas óptimas, caracterizadas por un clima predominantemente seco y una elevada radiación solar durante la mayor parte del año, factores que incrementan significativamente la eficiencia y el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos.

1.1.1 Problema general

¿De qué manera podemos utilizar celdas fotovoltaicas para realizar el suministro eléctrico en una vivienda de la Comunidad Minacachihuancaray, Distrito de San Antonio de Cachi, Provincia de Andahuaylas, Apurímac?

1.1.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la demanda energética de las viviendas de la comunidad Minacachihuancaray y qué factores se deben considerar en el diseño del sistema fotovoltaico off-grid?

- ¿Cuáles son las características técnicas del sistema fotovoltaico off-grid a utilizar y cuáles son sus limitaciones de diseño?
- ¿De qué manera un proyecto de generación solar será sostenible?
- ¿Cuáles son los posibles impactos ambientales y sociales del diseño de un sistema fotovoltaico off-grid?

I.2 Objetivos

I.2.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de generación off grid utilizando celdas fotovoltaicas para suministrar energía eléctrica a una vivienda de la comunidad de Minacachihuancaray- San Antonio de Cachi- Andahuaylas.

I.2.2 Objetivos específicos

- Calcular la demanda energética diaria de una vivienda de la comunidad de Minacachihuancaray – San Antonio de Cachi, identificando las necesidades de consumo eléctrico diario.
- Determinar las características técnicas del sistema de generación fotovoltaica.
- Realizar un análisis técnico-económico para evaluar la sostenibilidad del diseño del sistema fotovoltaico off-grid, asegurando su viabilidad a largo plazo.
- Analizar los impactos ambientales y sociales asociados al diseño de un sistema fotovoltaico off-grid, para garantizar su compatibilidad con la comunidad.

I.3 Importancia y alcance de la investigación

La presente investigación adquiere relevancia al proponer una solución técnica y sostenible para el suministro de energía eléctrica en una vivienda de la comunidad de Minacachihuancaray, ubicada en una zona rural donde el acceso a la red eléctrica convencional es limitado o inexistente. El estudio contribuye al desarrollo de alternativas energéticas basadas en fuentes renovables, orientadas a mejorar la calidad del servicio eléctrico en contextos

rurales, reduciendo la dependencia de soluciones energéticas tradicionales de alto costo y bajo nivel de confiabilidad.

Desde el punto de vista técnico, la investigación es importante porque desarrolla un diseño detallado de un sistema fotovoltaico off-grid, considerando criterios de dimensionamiento, confiabilidad y desempeño energético adecuados a las condiciones climáticas y geográficas de la zona de estudio. Asimismo, incorpora un análisis técnico-económico que permite evaluar la sostenibilidad del sistema a lo largo de su vida útil, aportando información relevante para la toma de decisiones en proyectos de electrificación rural.

En cuanto a su alcance, el estudio se limita al diseño y evaluación de un sistema fotovoltaico off-grid aplicado a una vivienda representativa de la comunidad de Minacachihuancaray, sin considerar la interconexión a la red eléctrica nacional. Los resultados obtenidos no pretenden generalizarse de manera directa a toda la comunidad; sin embargo, el modelo desarrollado puede ser replicado y adaptado a otras viviendas rurales con características similares, sirviendo como referencia técnica para futuros proyectos de generación eléctrica con energías renovables en zonas rurales del país.

I.4 Limitaciones de la investigación

La presente investigación presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas para una correcta interpretación de los resultados. En primer lugar, el estudio se enfoca exclusivamente en el diseño y análisis de un sistema fotovoltaico off-grid aplicado a una vivienda representativa de la comunidad de Minacachihuancaray, por lo que los resultados obtenidos no pueden generalizarse de manera directa a toda la comunidad ni a otros contextos con características socioeconómicas y de consumo diferentes.

Asimismo, el análisis técnico y económico se basa en datos de consumo estimados y en condiciones promedio de radiación solar de la zona, lo que implica que variaciones estacionales, cambios en los hábitos de consumo o condiciones climáticas extremas podrían afectar el desempeño real del sistema. Del mismo modo, los costos de inversión, operación y mantenimiento considerados corresponden a precios referenciales vigentes al

momento del estudio, por lo que futuras variaciones en el mercado podrían modificar los indicadores económicos obtenidos.

Finalmente, la investigación no contempla la evaluación experimental del sistema mediante su implementación física. Tampoco se incluyen estudios detallados de impacto ambiental cuantitativo a largo plazo, limitándose el análisis a una evaluación cualitativa de los beneficios ambientales y sociales derivados de la utilización de energía solar fotovoltaica.

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

II.1 Marco teórico

II.1.1 Energía Solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable que mediante el uso de la radiación del sol produce electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Este proceso implica que cuando se incide luz solar sobre un material semiconductor, en esta ocasión silicio, lo que ocurre es que los electrones se excitan y se crean una corriente continua eléctrica. A continuación, esta electricidad se puede utilizar directamente en sistemas de corriente continua o convertida en corriente alterna a través de un inversor para su distribución y utilización en aplicaciones convencionales (Lorenzo, 2021).

Dado que es sostenible, disponible de manera ilimitada e insume bajos costos operativos, el uso de la energía solar fotovoltaica ha aumentado en gran medida a escala mundial. Por oposición a los combustibles fósiles, esta fuente de energía no produce emisiones contaminantes y puede evolucionar tanto en grandes plantas de generación como en sistemas independientes (off-grid) para ciudades alejadas de la red eléctrica (International Energy Agency [IEA, 2023).

De acuerdo con Müller et al. (2022), los sistemas fotovoltaicos son eficientes, ya que dependen de ciertos factores tales como la radiación solar disponible, la inclinación de los paneles, las condiciones climáticas y la calidad de los materiales utilizados en su fabricación. En climas con alta irradiación solar, como en muchas zonas de Perú, son muy factibles para tal fin la implementación de sistemas fotovoltaicos off-grid, que pueden brindar acceso

a la electricidad a las comunidades rurales descubiertas de la red convencional eléctrica.

Un sistema fotovoltaico desde un punto de vista técnico consta de módulos solares, reguladores de carga, baterías de almacenamiento e inversores. Los paneles fotovoltaicos transfieren la energía del sol en electricidad y el regulador de carga protegen las baterías y optimizan su rendimiento. Las baterías permiten almacenar la energía (generada en el día) para su uso en horas nocturnas o en condiciones de baja radiación garantizando la autonomía del sistema (González y Ramírez, 2020).

Varios estudios han demostrado que el suministro de energía solar fotovoltaica en zonas rurales peri urbanas ayuda a reducir la pobreza energética, mejorar la calidad de vida y promueve el desarrollo sostenible. En particular, la energía solar ha sido utilizada con éxito para electrificar residencias, escuelas, centros de salud y pequeñas empresas para uso de electrodomésticos básicos, sistemas de comunicación y equipos médicos esenciales (Ortiz et al., 2021).

En el caso de Perú, el país tiene un potencial solar importante, con lo que, desde la sierra hasta la selva alta, la radiación promedio oscila entre 5.0 a 6.5 kWh/m²/día. Esta condición hace que la energía fotovoltaica sea una opción eficiente y sostenible para la dotación de electricidad a comunidades rurales que por su situación geográfica no son fáciles de alcanzar a partir de la red nacional (Ministerio de Energía y Minas del Perú [MINEM], 2022).

Puesto que su impacto en el desarrollo social y económico de comunidades aisladas es positivo, la energía solar fotovoltaica es una solución viable para la electrificación rural. Sin embargo, éste es exitoso si cuenta con un adecuado diseño, mantenimiento oportuno y acceso a financiamiento para su implementación para así garantizar su sostenibilidad en el largo plazo (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2023).

II.1.2 Sistemas fotovoltaicos off-grid:

Los sistemas fotovoltaicos off-grid son instalaciones de generación eléctrica autónomas que no dependen de la red pública, diseñadas principalmente para abastecer zonas rurales o aisladas donde la extensión de

la red convencional resulta técnica o económicamente inviable. Estos sistemas convierten la radiación solar en energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos y la almacenan en baterías para su uso posterior, garantizando continuidad del suministro. Su diseño se basa en el análisis de la demanda energética, el recurso solar disponible y la autonomía requerida. Diversos estudios destacan que los sistemas off-grid representan una solución sostenible y confiable para la electrificación rural, al reducir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la calidad de vida de las comunidades beneficiadas (IRENA, 2023; CEPAL, 2021).

II.1.2.1 Paneles Fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos son el componente principal de los sistemas solares, encargados de convertir la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Están compuestos por celdas semiconductoras, generalmente de silicio, que generan corriente continua al ser expuestas a la luz solar. Su rendimiento depende de factores como la irradiancia, la temperatura, la orientación y la inclinación. En aplicaciones rurales, los paneles fotovoltaicos destacan por su larga vida útil, bajo mantenimiento y facilidad de instalación, lo que los convierte en una alternativa adecuada para sistemas autónomos de generación eléctrica (Lorenzo, 2021; González & Ramírez, 2020).

II.1.2.2 Baterías de Almacenamiento.

Las baterías de almacenamiento permiten acumular la energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos para su utilización en periodos sin radiación solar, como durante la noche o en días nublados. Su función es esencial en sistemas off-grid, ya que garantizan la continuidad del suministro eléctrico y la estabilidad del sistema. Actualmente, las baterías de litio presentan ventajas significativas frente a tecnologías tradicionales, como mayor densidad energética, mayor profundidad de descarga y una vida útil más prolongada. Estas características las hacen especialmente adecuadas para aplicaciones rurales, donde la confiabilidad y el bajo mantenimiento son criterios prioritarios (IRENA, 2023; Mensah, 2022).

II.1.2.3 Regulador de Carga

El regulador de carga es el dispositivo encargado de controlar el flujo de energía entre los paneles fotovoltaicos, las baterías y las cargas eléctricas, protegiendo al sistema frente a sobrecargas y descargas profundas. Su función principal es optimizar el proceso de carga de las baterías, prolongando su vida útil y asegurando un funcionamiento seguro del sistema. Existen reguladores de tipo PWM y MPPT, siendo estos últimos más eficientes al maximizar la energía extraída de los paneles. En sistemas off-grid rurales, el uso de reguladores adecuados resulta fundamental para garantizar la estabilidad operativa y la sostenibilidad técnica del sistema fotovoltaico (INACAL, 2021; Domínguez Vargas, 2024).

II.1.2.4 Inversor

El inversor es el equipo encargado de convertir la corriente continua generada por los paneles y almacenada en las baterías en corriente alterna, compatible con los equipos eléctricos de uso doméstico. Además de la conversión energética, muchos inversores modernos integran funciones de protección, monitoreo y gestión de cargas. En sistemas fotovoltaicos off-grid, el inversor desempeña un rol clave en la calidad del suministro eléctrico, asegurando niveles adecuados de tensión y frecuencia. Su correcta selección debe considerar la potencia demandada, la eficiencia y la compatibilidad con el sistema de almacenamiento, aspectos determinantes para la confiabilidad del sistema en entornos rurales (Mbinkar et al., 2021; Shrestha, 2023).

II.1.3 Factores climáticos y de radiación solar

El diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos en entornos rurales requiere una evaluación detallada de diversos factores que influyen en su desempeño y viabilidad. Este proceso implica la determinación de la demanda energética de las viviendas, el análisis de variables ambientales y la utilización de herramientas de simulación para la optimización del sistema.

II.1.3.1 Metodologías para el cálculo de la demanda energética en viviendas rurales

El cálculo de la demanda energética en zonas rurales es un paso primordial al momento de diseñar sistemas fotovoltaicos. Para su diseño se utilizan metodologías que toman en cuenta el consumo diario del conjunto de los dispositivos eléctricos, la estabilidad en la eficiencia de los equipos y los patrones de uso de los habitantes. Según López et al. (2020), la estimación se hace a través de riesgos de consumo, análisis de palabras promedia y los datos históricos de consumo eléctrico en localidades similares.

En este sentido, la metodología de balance energético es muy utilizada debido a que permite determinar cómo la potencia requerida y la autonomía del sistema varían basándose en la demanda diaria. Según Pérez y Gómez (2019), este enfoque constituye la determinación de los dispositivos eléctricos empleados, de su potencia nominal y plazo de uso diario, para determinar el consumo total en kilovatios-hora por día (kWh/día). Esta información es importante para determinar una potencia que permita dimensionar adecuadamente el generador fotovoltaico y el sistema de almacenamiento energética.

II.1.3.2 Factores que influyen en el diseño del sistema

En el diseño de un sistema está condicionado por diversos factores, así como por la del suministro y por el rendimiento. Uno de los principales es la radiación solar disponible en la zona de instalación. Por ejemplo, los estudios de Rodríguez y Méndez (2021) enfatizan la importancia de examinar la irradiación solar promedio, como esta afecta directamente la cantidad de energía a la cual los paneles fotovoltaicos pueden generar.

Otro criterio clave para determinar la potencia del sistema es el consumo energético del usuario además de la radiación. La variabilidad en el consumo, los picos de demanda y la eficiencia de cada uno de los dispositivos eléctricos debían ser tenidos en cuenta para evitar que la generación fuese sobredimensionada o insuficiente. Además, la autonomía del sistema es un parámetro fundamental de características,

ya que es condición para la operación en bajas radiaciones. Conforme definen Torres et al. (2022), se considera que la autonomía significa la cantidad de días que el sistema podrá dar energía sin contar con ingreso solar, lo que está directamente ligado con el tamaño del banco de baterías.

Por una parte, el almacenamiento en baterías es un componente crítico en el día a día de un sistema fotovoltaico. Su selección se trata de la profundidad de descarga más permitida, vida útil y el almacenamiento que tiene sentido. La elección entre baterías de plomo-ácido y baterías de ion-litio se decide en función de un análisis costo-beneficio, en tanto que es preciso evaluar la capacidad de carga y durabilidad de cada tecnología (Jiménez y Castro 2020).

II.1.4 Uso de software de simulación para optimización del sistema

El uso de herramientas computacionales para el diseño de los sistemas fotovoltaicos nos permite optimizar su rendimiento y economía. PVsyst y HOMER son softwares que se usan ampliamente para el modelado de sistemas fotovoltaicos y evaluar su comportamiento en diferentes condiciones ambientales y de consumo.

PVsyst es una herramienta profesional para el análisis del rendimiento de sistema solares que permiten la generación de energía esto mediante el suministro de datos climáticos y la configuración del sistema.

Según Martínez y Herrera (2021), este software es útil para determinar la inclinación óptima de los paneles, calcular las pérdidas por sombreado y estimar la producción anual de energía.

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables), es un software para sistemas de análisis de viabilidad técnica y económica sobre energía híbrida. Esta herramienta nos facilita simular el conjunto de posibles combinaciones de generación y almacenamiento con esto usarse en la elección de generación en función de los costos de inversión operación y mantenimiento.

Investigaciones recientes (González et al., 2022) demostraron que puede ser útil utilizar HOMER para ayudar a seleccionar configuraciones óptimas en cuanto al coste y fiabilidad del suministro eléctrico cuando se aplica a proyectos de electrificación rural.

II.1.5 Impacto de la Energía Solar en Comunidades

Implementar sistemas fotovoltaicos en poblaciones rurales han demostrado ser una estrategia eficaz en los términos de optimización del acceso a la energía eléctrica, con esto reduciendo la brecha energética y promoviendo un desarrollo sostenible. Además de ser ventajosos en términos ambientales, estos sistemas generan efectos positivos en términos de la economía y de manera paralela a la calidad de vida de los residentes.

II.1.5.1 Beneficios sociales, económicos y ambientales de la implementación de sistemas fotovoltaicos

La introducción de tecnologías basadas en la energía solar en comunidades rurales viene dando como resultado muchos beneficios. En el aspecto social es el acceso a la electricidad, mejora la educación, la salud y la comunicación. Según Fernández et al. (2021), la iluminación disponible en los hogares y las escuelas extiende las horas de estudio, lo que permitiría durante la educación facilitar el aprendizaje y reducir la brecha educativa entre las áreas urbanas y rurales. Además, el acceso a la electricidad contribuye a mejorar la provisión de servicios de salud porque permite el uso de equipos médicos básicos, también es la conservación de medicamentos que requieren refrigeración.

Desde un punto de vista económico, la generación de energía solar reduce la dependencia a los combustibles fósiles, así como los costos asociados al consumo de energía. Durante la aplicación, los sistemas fotovoltaicos han proporcionado una reducción importante de los costos en queroseno, diésel y la adquisición de baterías desechables que son comunes en zonas con falta de acceso a la red eléctrica (Pérez y Gómez, 2020). Adicionalmente, la disponibilidad de energía no solo afecta al área rural ni afecta de manera directa, sino

que también sirve para el desarrollo de actividades productivas, lo que propicia el emprendimiento local y la generación de empleo.

En el ámbito ambiental, el desempeño de la energía solar fotovoltaica para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es sustituir fuentes de energía contaminantes por fuentes de energía limpias y renovables. Según Torres y Ramírez (2019), la sustitución de otros tipos de combustibles, como los fósiles por energía solar en poblaciones rurales ha permitido reducir hasta un 70%, las emisiones per cápita de CO₂ contribuyendo a un desarrollo más sostenible y una mitigación más participante en los países, en contraposición tanto del objetivo global de mitigación del cambio climático.

II.1.5.2 Reducción de la pobreza energética y mejora de la calidad de vida de los habitantes

Muchas comunidades rurales caran contra el problema de la pobreza energética, entendida como falta de capacidad de acceder a servicios energéticos modernos y asequibles. La implementación de sistemas fotovoltaicos han demostrado ser una herramienta importante para poder abordar este problema al proporcionar acceso a una fuente de energía fiable y asequible. De acuerdo con los estudios de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2021), los hogares pueden acceder a la electricidad a través de sistemas solares y esto mejora sus condiciones de vida, lo que aumenta su capacidad productiva, acceso a la información y la seguridad de sus seres queridos.

Un aspecto crucial para poder reducir la pobreza energética es proporcionar energía autónoma mediante dichos sistemas. En contraste con las redes eléctricas convencionales, que requieren una infraestructura costosa y difícil de acceder en zonas remotas, los sistemas fotovoltaicos permiten la generación distribuida de energía e inducir una disminución de las fuentes externas de energía y condiciones de resiliencia de las comunidades en caso de cortes de suministro eléctrico (Rodríguez & Méndez, 2020).

Un impacto importante también son los empoderamientos de las comunidades a partir de la capacitación y generación de empleo local. Programas de electrificación con energía solar incorporan la formación de técnicos locales, los cuales se encargan del mantenimiento y gestión del sistema. Este enfoque garantiza la rentabilidad a largo plazo de los proyectos y facilita el desarrollo de capacidades técnicas y económica de los grupos de beneficiarios, Jiménez y Castro (2022) sostienen que también permite la doble caja de la sostenibilidad.

II.1.5.3 Casos de éxito en Perú y Latinoamérica

Durante los últimos años, distintos países de América Latina han impulsado la electrificación rural con distintos proyectos de energía solar, logrando con esto resultados positivos en términos de acceso a la energía y el desarrollo comunitario.

En Perú, por ejemplo, donde el programa Masificación de Energía Solar en Zonas Rurales ha contribuido a instalar miles de sistemas fotovoltaicos en comunidades aisladas de los Andes y en la Amazonía. Según el Ministerio de Energía y Minas del Perú (2022), más de 200,000 personas han sido beneficiadas por este programa con mejoramiento de sus condiciones de vida y la promoción del uso de tecnologías limpias en zonas de difícil acceso.

En Bolivia, la energía solar del proyecto Luz para el Vivir Bien ha llegado a comunidades indígenas y rurales, ahí la electrificación sostenible promueve el acceso a la educación, los servicios básicos, etc. Un estudio de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2021) mostro que este programada logro reducir la pobreza energética en más de un 40% en zonas donde se implementó este proyecto. Con esto contribuyendo en la inclusión social y el desarrollo económico.

En Argentina, cuya electrificación con energía solar se impulsó mediante el Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER) en provincias con baja cobertura eléctrica. González et al. (2021) se mostró que la iniciativa logró instalar más de 10,000 sistemas

fotovoltaicos, con esto beneficiando a familias, escuelas y centros de salud para regiones aisladas.

II.2 Antecedentes del estudio

Los sistemas fotovoltaicos aislados han mostrado un avance significativo para convertirse en una opción atractiva para la generación de energía independiente. La tecnología mejorada de paneles solares, junto con los sistemas de almacenamiento mejorados, permite que estos sistemas proporcionen un suministro de energía constante en ubicaciones distantes. La utilización de energía renovable a través de sistemas fotovoltaicos da como resultado beneficios ambientales sostenibles junto con la independencia de la fuente tradicional. Con la revisión de los antecedentes se proporciona una visión detallada de la planificación de la generación de energía independiente y ofrece información sobre las innovaciones recientes que dan forma al campo de la producción de energía autónoma. La revisión de los antecedentes encuentra evidencia que confirma tanto la importancia como la factibilidad de la propuesta, junto con el descubrimiento de lecciones aprendidas de experiencias pasadas.

II.2.1 Antecedentes internacionales

Múltiples estudios han demostrado que los sistemas fotovoltaicos aislados presentan una viabilidad como alternativa a la electrificación convencional en comunidades rurales. Uno de esos estudios fue en Ecuador, donde se realizó el diseño fotovoltaico autónomo para suministrar energía a una casa, en San Juan de Ilumán – Ibarra. El objetivo del estudio fue evaluar la disponibilidad de radiación solar, dimensionamiento de los componentes y consumo energético diario estimado. Se realizaron simulaciones con PV Sol, donde se planteó un sistema compuesto de dos paneles solares monocristalinos de 500W y cuatro baterías de 12V, un inversor de 1.5KW y un regulador de carga de 40A. Los resultados demostraron que estas soluciones son efectivas y sostenibles debido a la alta radiación solar en Ecuador lo que lo hace aplicable a zonas rurales. Asimismo, la importancia de fomentar la importancia del uso de energías renovables es para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y con esto mitigar el impacto medioambiental. (Domínguez Vargas, 2024).

Un estudio similar fue realizado en Guayaquil, Ecuador en la comunidad La Masa 1 donde los residentes dependían de generadores de combustión interna. Esto generaba un costo elevado y una acción importante para la contaminación ambiental. Como solución a este problema, se realizaron visitas técnicas y recopilación de datos esto como el fin de recolectar los datos necesarios para el diseño fotovoltaico y posterior dimensionamiento con PVsyst. El método propuesto incluía paneles solares, baterías de almacenamiento, reguladores de carga e inversores para llenar y soportar el abasto eléctrico confiable y sostenible. El sistema hubo de implementar que no dependiera de generadores a diésel todos los costos operativos y contaminación de gases. Igualmente, el acceso a electricidad en aumento significativamente la calidad de vida de los habitantes, ello animó a la utilización de las energías renovables como solución a medio plazo (Tumbaco Chumo & Pantaleón Iñiguez, 2023).

En lugares como el África subsahariana se evaluó la viabilidad de mini redes fotovoltaicas esto como fuente de energía en las comunidades rurales donde la infraestructura energética es limitada. En tal contexto se diseñó un sistema de 15 kW hecho de paneles solares, almacenamiento en baterías, inversores DC/AC y una red distribuidora eléctrica. El costo total estimado en el análisis económico con el software HOMER fue de \$122,337 de los cuales \$29,946 son gasto de mantenimiento a lo largo un lapso de 10 años. Los resultados de dicho estudio mostraron que las mini redes eléctricas solares con las cuales proporcionaban su propia electricidad son efectivas y a partir de ello presentan bajos costes de funcionamiento y una eficiencia energética alta. También se concluyó que este diseño puede replicarse en otras regiones sin acceso eléctrico esto para contribuir al desarrollo social y económico de las comunidades rurales. (Mbinkar, Asoh, Tchuidjan, & Baldeh, 2021).

En Ghana se realizó una investigación para evaluar la viabilidad de los sistemas autónomos de energía solar en comunidades rurales. Dicho estudio se centró en la radiación solar disponible, la demanda de energía de los hogares y el coste de implantación de estos sistemas. Los resultados sugieren que ante la adopción de los sistemas solares autónomos se presentó un impacto en la reducción de la pobreza energética, con esto permitiendo a otras

personas el acceso a la iluminación, la comunicación. Además, se destacó el uso de la energía solar proporciona un beneficio a la reducción de las emisiones contaminante y favoreció a un desarrollo más sostenible (Mensah, 2022).

Otra aplicación se realizó en Nepal para diseño y análisis de un sistema autónomo de la red destinado a comunidades aisladas remotas sin conexión a la red. Dicha investigación determino un presupuesto energético de la población con el que se puede definir un sistema de distribución. El estudio se enfocó en que, aunque la electrificación a través de energía solar mejoró el acceso a los servicios básicos, resultó en beneficios socioeconómicos como los beneficiados por la comunidad y favoreció el desarrollo (Shrestha, 2023).

Los estudios mencionados anteriormente demuestran que los sistemas sin conexión a la red en zonas remotas son una solución eficaz y sostenible para la electrificación de las comunidades rurales sin acceso a la red. En países como Ecuador, Ghana y Nepal, su implementación se ha logrado mejorar la calidad de vida de los habitantes, reducir la pobreza energética y facilitar la implementación de energías limpias. Además, la investigación sobre mini redes solares en África Subsahariana ha demostrado que este modelo de electrificación puede replicarse en otras áreas garantizando una ventilación energética eficiente y económica. Los fundamentos de estos estudios vienen por la importancia de tener en cuenta diversos aspectos en la planificación e implementación de estos sistemas como la radiación solar disponible, diseño óptimo de los componentes y análisis costo. Al ser una herramienta viable a nivel ambiental, económico y social, los resultados resultan en presumiblemente una estrategia comprometida al uso de la energía solar fotovoltaica en el suministro de energía a comunidades rurales a escala mundial.

II.2.2 Antecedentes nacionales

A continuación, se presentan antecedentes nacionales relevantes con respecto al diseño e implementación de sistemas fotovoltaicos off-grid en diversas regiones del Perú. Las investigaciones de estas tienen como posible y viable alternativa teórica el entender las posibilidades técnicas, económicas y ambientales de apropiarse de este tipo de sistemas en comunidades rurales

sin acceso a la red eléctrica, lo cual es de apoyo e investigación claves para este estudio actual.

Una investigación con énfasis en determinar la propuesta del diseño de un sistema fotovoltaico autocontenido, con el fin de abastecer de energía eléctrica al caserío Juan Velasco Alvarado, ubicado en la región de Cajamarca, llevada a cabo por Peña y Acuña (2022). El potencial de la energía se evaluó según la NASA software con lo que se logró determinar el mes con mayor incidencia solar febrero con una media de 3.71 kWh/m². En base a estos datos se realizó el dimensionamiento del sistema cuyo componente del cual estaba compuesto por 24 paneles solares de 340W, 20 baterías de 260 Ah, 2 controladores de 80A y 2 inversores de 4kW, y el correspondiente cableado para una distribución adecuada de la energía en la localidad.

El estudio financiero de la propuesta arrojó que el proyecto no resultaba económica mente viable, ya que el Valor Actual Neto (VAN) fue de -84,850.076 soles y la Tasa Interna de Retorno (TIR) fue 1%, lo que denota que la inversión inicial no podría recuperarse en un período razonable de tiempo. Sin embargo, el estudio apuntó que si bien con limitaciones económicas, la factibilidad de implantar un sistema fotovoltaico reportaría una reducción anual de 2.150 TCO₂ (toneladas de CO₂ equivalente) en la emisión de contaminantes, lo que ratifica el beneficio ambiental que representaría y lo contribuiría con la mitigación al cambio climático. Este antecedente es relevante para el presente estudio puesto que destaca la necesidad de tener que tomar en cuenta los factores económicos al igual que los impactos ambientales en la planificación e implementación de proyectos fotovoltaicos en comunidades rurales del país (Peña & Acuña, 2022).

Por su lado, Escobedo León (2018) realizó un estudio orientado a implementar un sistema fotovoltaico en un laboratorio de cómputo del Colegio Nacional "Coloso y Emblemático Jaén de Bracamoros" situado en la región de Cajamarca. El objetivo de dicha investigación se centro en demostrar como la utilización de energías renovables podría ayudar a reducir el uso de fuentes de electricidad convencionales y mostrar el beneficio económico y medioambientales.

Luego para el diseño del sistema, se hizo un análisis de la radiación solar disponible teniendo en cuenta tres principales fuentes: Atlas de Radiación Solar del Perú (4,75 kWh/m²/día), software Meteonorm (5,50 kWh/m²/día) y Solarius Plus (6,15 kWh/m²/día). Para asegurar un diseño conservador, se resolvió usar el valor bajo (4.75 kWh/m²/día) para el cálculo. De acuerdo con estos datos, el sistema fue dimensionado con 24 paneles fotovoltaicos de 150 Wp, 12 baterías 200 Ah, un cargador regulado 150/70 y un inversor de 2500 W con una potencia instalada de 3.6 kWp.

Desde el punto de vista económico, el proyecto fue una inversión de S/ 63,747.63, sin embargo, al considerar el financiamiento de la UGEL obtuvimos un VAN positivo de S/ 2,058.81 y TIR del 21%, lo que convierte a este proyecto en viable financiera desde el plano mediano y largo plazo. Con base en esta antecedente queda en evidencia que, bajo condiciones de financiamiento adecuadas, los sistemas fotovoltaicos pueden ser económicamente rentables y constituir una opción viable para mejorar el acceso a la energía en instituciones educativas (Escobedo León, 2018).

En otro contexto, Canchumanya Díaz (2023) considera la implementación de generación fotovoltaica en el alimentador A4213 de la Subestación Parque Industrial, para evaluar los beneficios de incorporar producción solar distribuida en redes de media tensión. El estudio se basó en la necesidad de mejorar la calidad del suministro eléctrico con esto reduciendo la amplitud de las fluctuaciones de tensión con ello garantizando una mayor estabilidad en el sistema.

Para el estudio de modelado del sistema, se utilizaron herramientas particularmente desarrolladas como PVsyst 7.2 las cuales permitieron determinar la potencia óptima y la ubicación óptima de los paneles solares dentro de la red de distribución. En los resultados se demostró que la integración de sistemas fotovoltaicos en las redes de distribución tiene el potencial de reducir de manera sustancial las variaciones de tensión, en particular durante los periodos de máxima demanda energética.

Finalmente, el estudio estableció que la energía solar puede ser empleada como un recurso secundario de sistemas convencionales eléctricos

para proporcionar estabilidad a la red y reducir el uso de generación para fuentes fósiles. También destaca la necesidad de integrar sistemas de almacenamiento de energía, tales como la batería de litio, para obtener la mayor eficiencia en el sistema y contar con la provisión continua (Canchumanya Díaz, 2023).

Por último, Gamarra Tupac Yupanqui et al. (2021) trabajó sobre el tema de la incorporación de electricidad fotovoltaica en edificios urbanos de Cusco, en específico en un edificio multifamiliar. El objetivo del estudio fue evaluar la factibilidad técnica y económica de su uso para la abasteció de las áreas comunes interiores y exteriores del edificio con el fin de reducir costo de electricidad y de promover el uso de fuentes de energía renovable en centros urbanos.

La metodología del estudio incluyó un análisis detallado de radiación solar global, dimensionamiento de paneles, inversores y baterías, así como cálculos específicos para determinar inclinación óptima, distancia entre paneles y efectos de sombras sobre eficacia del sistema. Desde el punto de vista económico, por si mientras la inversión inicial fue elevada, se pudo evidenciar que el ahorro en la apertura de la factura eléctrica en el tiempo largo, lo que permite recuperar dicho la inversión en un periodo aceptable, conformando así el uso de energía solar como una alternativa rentable y sostenible en la dimensión urbana (Gamarra Tupac Yupanqui et al., 2021).

En este sentido, estos antecedentes nacionales destacan la aplicabilidad y relevancia de los sistemas fotovoltaicos off-grid en los diferentes contextos de proyecto en el país, tales como en el caso de comunidades rurales y en el caso de espacios urbanos. Sin embargo, se observa que, aunque las barreras económicas pueden significar un obstáculo en la viabilidad de un proyecto, en muchos casos la viabilidad financiera del mismo puede optimizarse mediante esquemas de financiamiento y estrategias de almacenamiento energético. Además, se resalta la necesidad de valorar las condiciones climáticas, la radiación solar y la demanda energética particular por cada una de las zonas para asegurar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas a implementarse.

Por ser éste un conjunto de investigaciones en sí mismo una base sólida para el presente estudio, y al haber disponibles referencias pertinentes, las cuales servirán para solucionar el diseño de un sistema fotovoltaico off-grid para la Comunidad Mina, en el distrito de San Antonio de Cachi, provincia de Andahuaylas – Apurímac; garantizando un enfoque técnico, económico y ambientalmente viable.

II.3 Bases teóricas

II.3.1 Legislación y Políticas Energéticas en el Perú

El marco normativo que ha acompañado al desarrollo de energías renovables en el Perú ha sido paralelo a un entorno normativo orientado a la electrificación rural y el uso de fuentes de energía sostenibles. La legislación nacional establece directrices específicas para promover la energía solar, así como también han puesto en marcha programas gubernamentales para garantizar el acceso universal a la electricidad en diferentes comunidades remotas fuera de la red convencional.

II.3.2 Normativas nacionales sobre energías renovables y electrificación rural

En el Perú se dictan diversas normas que regulan el desarrollo y promoción de las energías renovables, sobre todo a la electrificación de zonas rurales. En este aspecto, se encuentra establecido por la Ley N.º 28832, Ley para Asegurar el Desarrollo Eficiente de la Generación Eléctrica, que constituye el marco general para la diversificación de la matriz energética del país mediante el fomento del uso de fuentes limpias y renovables en la producción de electricidad (Congreso de la República del Perú. Ministerio de Energía y Minas, 2022).

Así, el Ley N.º 1002 promulgada en 2008, declara de interés nacional la promoción de la generación eléctrica mediante fuentes renovables no convencionales tales como la solar fotovoltaica. Esta norma ha creado incentivos para que la inversión privada este centrada en el sector impulsando tarifas preferenciales y cualquiera de los mecanismos de subasta que provean competitividad de las energías renovables en el mercado eléctrico (Ministerio de Energía y Minas del Perú [MINEM], 2021).

A su vez, el Decreto Supremo N.º 018-2020-EM es otra normativa clave al regular la electrificación rural utilizando energías renovables; dictando lineamientos técnicos y administrativos para la instalación de sistemas fotovoltaicos en las comunidades aisladas. Este decreto aclara la importancia de sistemas autónomos de generación y fomenta proyectos de generación descentralizada en conjunción con gobiernos regionales y locales. (MINEM, 2020).

En cuanto a la tarificación, el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN) regulan la estructura de costos y tarifas aplicadas a los usuarios de sistemas fotovoltaicos rurales asegurando precios accesibles y sostenibles en el tiempo (OSINERGMIN, 2022).

II.3.3 Programas gubernamentales de electrificación con energía solar

El estado peruano viene poniendo en marcha distintos proyectos para suministrar electricidad a comunidades rurales mediante el sistema fotovoltaico. Un ejemplo de los programas son los Programas Nacional de Electrificación Rural (PNER), administrados bajo la supervisión del MINEM. Donde el objetivo principal del programa se centra en ampliar el acceso de la electricidad en zonas remotas mediante la instalación de paneles fotovoltaicos y la construcción de pequeños centros de energía renovable (MINEM, 2022).

En el contexto del PNER, se llevaron a cabo proyectos específicos tales como el Programa de Masificación de Energía Solar en Zonas Rurales a través del cual se ha logrado la instalación de más de 200,000 paneles solares en comunidades de la sierra y la Amazonía, beneficiando a familias habitantes de estas regiones que antes dependían de fuentes de iluminación contaminantes e inaceptablemente costosas como el queroseno y velas (MINEM, 2021).

Un programa pertinente es el Fondo de Inclusión Social Energético (FISE), un programa para subsidiar el acceso a la electricidad y como resultado una disminución de la pobreza energética en el país. Según OSINERGMIN (2021), a través del FISE se ha financiado el suministro de proyectos de electrificación con energía solar a comunidades indígenas y

rurales, así como para promover modelos de financiamiento sostenible y tarifas que alcancen a los usuarios.

Además, el Plan Nacional de Energía Renovable 2020-2030 constituye un conjunto de objetivos estratégicos para el crecimiento de la energía eléctrica con fuentes renovables en el Perú dando prioridad a la energía solar en áreas de difícil acceso. El plan a futuro contempla el desarrollo de infraestructura para el almacenamiento de energía, capacitación de los técnicos locales en el manejo de sistemas fotovoltaicos y al aplicar nuevas tecnologías tiene como objetivo mejorar la eficiencia de los sistemas (MINEM, 2020).

La cooperación internacional ha sido también un factor clave para la ejecución de programas de electrificación rural. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) han financiado proyectos piloto de energía solar en el Perú que han resultado ser modelos de electrificación sostenibles que pueden replicarse en otras regiones del país (BID, 2021).

II.3.4 Normas Técnicas para la Implementación de Sistemas Fotovoltaicos

Las normativas técnicas que rigen la implementación de los sistemas fotovoltaicos en el Perú aseguran su seguridad, eficiencia y sostenibilidad. Estas regulaciones definen los estándares de calidad y certificación de los equipos a utilizar y las líneas de los lineamientos para la instalación y operación de los sistemas autónomos.

II.3.5 Regulaciones sobre la instalación y operación de sistemas fotovoltaicos autónomos

El sistema fotovoltaico autónomo puramente, en zonas rurales y aisladas tiene disposiciones específicas en el marco normativo peruano para su instalación y operación. Además, el Decreto Supremo N.º 018-2020-EM el cual fue emitido por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), regula estos procedimientos técnicos para la implementación de estos sistemas restantes, definiendo criterios de diseño, de seguridad y de mantenimiento (MINEM, 2020).

Por otra parte, la Norma Técnica Peruana NTP 399.401-2021 establece los requisitos mínimos para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en áreas sin acceso a la red eléctrica. En el caso de esta norma, abarca temas tales como la orientación e inclinación de los paneles, capacidad del sistema de almacenamiento y compatibilidad de los componentes eléctricos, con el fin de asegurar una energía eléctrica eficiente, y estable (Instituto Nacional de Calidad [INACAL], 2021).

Desde la perspectiva de la protección contra sobrecargas, cortocircuitos y fallas del sistema fotovoltaico, el Código Nacional de Electricidad – Suministro 2011 establece lineamientos de seguridad eléctrica. En este contexto, se demandan dispositivos de desconexión rápida, medianas de aislación y uso de materiales certificados para la instalación de sistemas solares (OSINERGMIN, 2022).

En el caso de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, la participación en sistemas fotovoltaicos conectados a la red se regula mediante el Reglamento de Generación Distribuida aprobado mediante Decreto Supremo N.º 009-2019-EM, el cual expone los procedimientos de integración de dichos sistemas a través del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). Los requerimientos aquí definidos son técnicos de conexión, inyección de excedentes y regulación de tarifas para usuarios que producen su propia electricidad con recursos renovables (MINEM, 2019).

II.3.6 Calidad estándar y certificación de equipos fotovoltaicos en el país

Una de las partes importantes para garantizar la calidad de rendimiento y durabilidad de los sistemas fotovoltaicos es la calidad de los componentes. En el Perú, el organismo responsable de fijar y verificar los estándares de certificación de paneles solares, inversores, baterías y equipo similar utilizado en la generación de energía solar es, el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

En el país, los paneles solares comercializados deben cumplir con las especificaciones técnicas reguladas en la Norma Técnica Peruana NTP 399.404-2022. Estos incluyen parámetros de eficiencia, tolerancia de

potencia, resistencia a condiciones climáticas hostiles y pruebas de durabilidad. Según las normas IEC 61215 e IEC 61730 internacionales, esta regulación propone que los módulos fotovoltaicos sean sometidos a pruebas de impacto mecánico, degradación por el calor y resistencia a la humedad con el fin de lograr garantizar su operación por un largo período (INACAL, 2022).

Con respecto a los inversores, la Norma Técnica Peruana NTP 399.405-2022 restringe la eficiencia y la compatibilidad de estos con la red eléctrica y sistemas autónomos. Los inversores se ven obligados a cumplir los estándares IEC 62109-1 y IEC 62109-2 que definen los criterios de seguridad eléctrica y falla en la conversión de CA a CC donde se mueve el voltaje del suministro CA a corriente continua (CC) que es la VCC que alimenta los elementos discretos (MINEM, 2021).

También son reguladas específicamente el almacenamiento de energía en baterías. Debido a este, la Norma Técnica NTP 399.406-2022 señala criterios de calidad de baterías de ion-litio y plomo-ácido basado en aspectos tales como la profundidad de descarga, vida útil y protocolos de seguridad de su instalación y manejo (OSINERGMIN, 2022).

Lo mismo, pues, aunque la certificación de los equipos es indispensable para la implementación de sistemas solares en el país, a falta de capacitación y acreditación de instaladores y técnicos no se podrán poner en marcha (las instalaciones solares fotovoltaicas). El MINEM aprobó el Reglamento Nacional de Capacitación en Energías Renovables donde establece que tanto los instaladores como profesionales que están encargado de una instalación de sistemas fotovoltaicos deben tener certificaciones expedidas por organismos acreditados; ratificando así los estándares técnicos y de seguridad en la ejecución de los proyectos (MINEM, 2021).

La implementación de sistemas fotovoltaicos en el Perú está regulada por normativas técnicas que garantizan su seguridad, eficiencia y sostenibilidad. Estas regulaciones establecen los lineamientos para la instalación y operación de los sistemas autónomos, así como los estándares de calidad y certificación de los equipos utilizados.

II.3.7 Regulaciones sobre la instalación y operación de sistemas fotovoltaicos autónomos

El marco normativo peruano establece disposiciones específicas para la instalación y operación de sistemas fotovoltaicos autónomos en zonas rurales y aisladas. El Decreto Supremo N.º 018-2020-EM, emitido por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), regula los procedimientos técnicos para la implementación de estos sistemas, definiendo criterios de diseño, seguridad y mantenimiento (MINEM, 2020).

Asimismo, la Norma Técnica Peruana NTP 399.401-2021 establece los requisitos mínimos para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en áreas sin acceso a la red eléctrica. Esta norma abarca aspectos como la orientación e inclinación de los paneles, la capacidad del sistema de almacenamiento y la compatibilidad de los componentes eléctricos, con el objetivo de garantizar un suministro energético eficiente y estable (Instituto Nacional de Calidad [INACAL], 2021).

Desde un enfoque de seguridad eléctrica, el Código Nacional de Electricidad – Suministro 2011 establece lineamientos para la protección contra sobrecargas, cortocircuitos y fallas en el sistema fotovoltaico. Dentro de este marco, se exigen dispositivos de desconexión rápida, protecciones contra sobretensión y el uso de materiales certificados para la instalación de sistemas solares (OSINERGMIN, 2022).

En el caso de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, el Reglamento de Generación Distribuida, aprobado mediante el Decreto Supremo N.º 009-2019-EM, establece los procedimientos para la integración de estos sistemas con el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). Este reglamento define los requisitos técnicos para la conexión, inyección de excedentes y regulación de tarifas para los usuarios que generan su propia electricidad con fuentes renovables (MINEM, 2019).

II.3.8 Estándares de calidad y certificación de equipos fotovoltaicos en el país

La calidad de los componentes de los sistemas fotovoltaicos es un aspecto fundamental para garantizar su rendimiento y durabilidad. En el Perú, el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) es el organismo encargado de

establecer y supervisar los estándares de certificación de paneles solares, inversores, baterías y otros dispositivos utilizados en la generación de energía solar.

La Norma Técnica Peruana NTP 399.404-2022 regula las especificaciones técnicas que deben cumplir los paneles solares comercializados en el país. Estas incluyen parámetros de eficiencia, tolerancia de potencia, resistencia a condiciones climáticas adversas y pruebas de durabilidad. En línea con las normas internacionales IEC 61215 e IEC 61730, esta regulación exige que los módulos fotovoltaicos sean sometidos a pruebas de impacto mecánico, degradación por temperatura y resistencia a la humedad para garantizar su operatividad a largo plazo (INACAL, 2022).

En cuanto a los inversores, la Norma Técnica Peruana NTP 399.405-2022 establece los criterios de eficiencia y compatibilidad de estos dispositivos con la red eléctrica y sistemas autónomos. Se exige que los inversores cumplan con los estándares IEC 62109-1 y IEC 62109-2, que regulan la seguridad eléctrica y la protección contra fallos en la conversión de corriente continua a corriente alterna (MINEM, 2021).

El almacenamiento de energía en baterías también está sujeto a regulaciones específicas. La Norma Técnica NTP 399.406-2022 establece criterios de calidad para baterías de ion-litio y plomo-ácido, considerando aspectos como la profundidad de descarga, la vida útil y los protocolos de seguridad en su instalación y manipulación (OSINERGMIN, 2022).

Además de la certificación de los equipos, la capacitación y acreditación de instaladores y técnicos es un requisito indispensable para la implementación de sistemas solares en el país. El Reglamento Nacional de Capacitación en Energías Renovables, aprobado por el MINEM, establece que los profesionales encargados de la instalación de sistemas fotovoltaicos deben contar con certificaciones emitidas por organismos acreditados, asegurando así el cumplimiento de estándares técnicos y de seguridad en la ejecución de los proyectos (MINEM, 2021).

II.4 Definición de términos

Energía solar fotovoltaica

Es la energía eléctrica obtenida a partir de la conversión directa de la radiación solar mediante dispositivos semiconductores. Se basa en el efecto fotovoltaico, que permite transformar la luz solar en corriente continua. Constituye una fuente renovable, limpia y sostenible. Su aplicación es especialmente relevante en zonas rurales aisladas.

Sistema fotovoltaico off-grid

Es un sistema de generación eléctrica autónomo que no está conectado a la red pública. Está compuesto por paneles solares, baterías, regulador de carga e inversor. Permite abastecer de energía a viviendas ubicadas en zonas sin acceso a la red convencional. Su diseño prioriza la autonomía y confiabilidad del suministro.

Radiación solar

Es la energía electromagnética emitida por el sol que llega a la superficie terrestre. Se mide generalmente en kWh/m²·día y depende de factores geográficos y climáticos. Constituye el recurso primario para los sistemas fotovoltaicos. Su nivel determina el potencial energético de una zona.

Irradiancia solar

Es la potencia de radiación solar recibida por unidad de área en un instante determinado. Se expresa en W/m² y varía a lo largo del día. Es un parámetro clave para el análisis del rendimiento de los paneles solares. Influye directamente en la generación instantánea de energía.

Demanda energética

Es la cantidad total de energía eléctrica requerida por una vivienda o sistema durante un periodo determinado. Se calcula a partir del consumo de los equipos eléctricos instalados. Permite dimensionar adecuadamente el sistema fotovoltaico. Es un factor crítico para garantizar la continuidad del suministro.

Panel fotovoltaico

Es el dispositivo encargado de convertir la radiación solar en energía eléctrica en forma de corriente continua. Está compuesto por un conjunto de celdas fotovoltaicas interconectadas. Su potencia nominal se expresa en vatios pico (Wp). Su rendimiento depende de condiciones ambientales y de instalación.

Fracción solar

Es el indicador que representa la proporción de la demanda energética cubierta por el sistema fotovoltaico. Toma valores entre 0 y 1. Una fracción solar cercana a 1 indica cobertura total de la demanda. Es un parámetro clave en sistemas autónomos.

Sobredimensionamiento

Es la condición en la que la capacidad del sistema fotovoltaico supera la demanda real del usuario. Se aplica como criterio de seguridad energética. Permite garantizar continuidad del suministro en condiciones adversas. Es común en sistemas off-grid rurales.

Costo de inversión (CAPEX)

Corresponde al costo inicial del sistema fotovoltaico, incluyendo equipos, instalación e impuestos. Representa la mayor inversión del proyecto. Se utiliza para evaluar la viabilidad económica. Es un parámetro base para el análisis financiero.

Costos de operación y mantenimiento (O&M)

Son los gastos asociados al funcionamiento y conservación del sistema durante su vida útil. Incluyen limpieza, inspección y reemplazo de componentes. Generalmente representan un bajo porcentaje del CAPEX. Son esenciales para el análisis de sostenibilidad económica.

Periodo de recuperación (Payback)

Es el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial mediante los ahorros generados. Se expresa en años. Permite evaluar la rentabilidad del proyecto. Un payback corto indica mayor atractivo económico.

Retorno de la inversión (ROI)

Es el indicador que mide la rentabilidad del proyecto en términos porcentuales. Relaciona el ahorro anual neto con la inversión inicial. Permite comparar alternativas energéticas. Es ampliamente utilizado en análisis técnico-económicos.

Electrificación rural

Es el proceso de provisión de energía eléctrica a comunidades rurales. Busca reducir brechas de acceso y mejorar la calidad de vida. En zonas aisladas se apoya en energías renovables. Es un eje clave del desarrollo sostenible.

Sostenibilidad energética

Es la capacidad de un sistema energético para mantenerse en el tiempo de forma técnica, económica y ambiental. Implica uso eficiente de recursos y bajo impacto ambiental. Garantiza beneficios a largo plazo para la población. Es un criterio central en proyectos rurales.

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

III.1 Hipótesis

III.1.1 Hipótesis General

El diseño de un sistema fotovoltaico off-grid, basado en el adecuado dimensionamiento de la demanda energética y condiciones solares, permite plantear una solución técnicamente viable para el suministro de energía eléctrica en una vivienda de la comunidad Minacachihuancaray.

III.1.2 Hipótesis Específicas

- El cálculo adecuado de la demanda energética diaria de la vivienda unifamiliar permite el diseño de un sistema fotovoltaico off-grid que cubre el consumo eléctrico requerido.
- La determinación correcta de la capacidad del sistema fotovoltaico off-grid garantiza un suministro continuo y estable de energía eléctrica en la vivienda unifamiliar.
- El análisis técnico-económico adecuado de los componentes del sistema fotovoltaico off-grid determina la selección de una alternativa eficiente y de bajo costo de operación y mantenimiento para la vivienda.
- El diseño de un plan de instalación y mantenimiento del sistema fotovoltaico off-grid, basado en protocolos técnicos y de gestión, asegura la sostenibilidad, eficiencia y prolongación de la vida útil del sistema en la vivienda de la comunidad.

III.2 Variables

III.2.1 Variable independiente

Sistema fotovoltaico off-Gridd

III.2.2 Variable dependiente

Suministro de energía eléctrica

III.3 Operacionalización de las variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Variable independiente: Sistema fotovoltaico off-grid	Sistema autónomo de generación eléctrica que convierte la radiación solar en energía eléctrica mediante paneles solares, almacenándola en baterías para su uso sin conexión a la red (Lorenzo, 2021).	Conjunto de componentes dimensionados (paneles, regulador, baterías e inversor) para cubrir la demanda energética diaria de una vivienda en Minacachihuanacaray.	Generación solar	Potencia instalada (W), Energía generada anual (kWh/año), Fracción solar	Razón
			Almacenamiento	Capacidad de baterías (Ah o kWh), Autonomía (días)	Razón
			Conversión	Potencia del inversor (W), Eficiencia (%)	Razón
Variable dependiente: Suministro de energía eléctrica	Es la provisión continua y estable de energía eléctrica para cubrir la demanda de una vivienda, garantizando disponibilidad y funcionamiento adecuado de los equipos eléctricos.	Se medirá a través de indicadores cuantitativos como cobertura de la demanda (%), energía no suministrada (kWh/año), fracción solar, autonomía del sistema (días) y continuidad del servicio durante el año.	Confiabilidad del suministro	Demanda energética (kWh/año), Fracción solar, Autonomía (días)	Razón
			Estabilidad energética	Cobertura de demanda (%), Continuidad del servicio	Razón
			Viabilidad económica	Payback (años), ROI (%), Ahorro anual (S/)	Razón
			Durabilidad del sistema	Vida útil proyectada (años), Degradación anual (%)	Razón

CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1 Área de estudio

La presente investigación se llevará a cabo en la comunidad de Minachihuancaray distrito de San Antonio de Cachi, Andahuaylas – Apurímac (Ver Figura 1 y 2).



Figura 1 Ubicación geográfica de la comunidad Cachihuancaray provincia Andahuaylas-Apurímac. Adaptado de Historia de Apurímac, Yonatan Ríos Ferrel, 2021, Scrib (<https://es.scribd.com/document/507520549/HISTORIA-DE-APURIMAC>).



Figura 2 Área y perímetro de vivienda unifamiliar en la comunidad de Minacachihuancaray. Vista satelital de la Zona de estudio, Adaptado de Google Earth (2025).

En la tabla 1 podemos visualizar los datos y detalles del área de estudio, así como la ubicación específica de la vivienda unifamiliar en la comunidad de Cachihuancaray.

Tabla 1 Características geográficas de la vivienda unifamiliar

NOMBRE	CENTRO POBLADO MINA CACHIHUANCARAY
Latitud y longitud	-13.78185, -73.60230
Altura	3526 msnm
Provincia/ Distrito	Andahuaylas – San Antonio de Cachi
Área total	413.13 m ²
Perímetro	75.88 m

Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Google Earth (2025).

IV.2 Diseño de investigación

El presente estudio se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo, ya que se basa en el análisis numérico y la evaluación objetiva de variables técnicas y económicas asociadas al diseño de un sistema fotovoltaico off-grid. A partir de la recopilación y procesamiento de datos medibles, como la demanda energética de la vivienda, la radiación solar disponible en la zona de estudio, la capacidad de generación del sistema y los costos de inversión, operación y mantenimiento, se realizaron cálculos y simulaciones que permitieron dimensionar los componentes del sistema y evaluar su desempeño. Asimismo, se aplicaron indicadores cuantitativos, tales como la fracción solar, el periodo de recuperación de la inversión y el retorno económico, con el fin de verificar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto. Este enfoque permitió obtener resultados verificables y reproducibles, fundamentales para sustentar técnicamente la propuesta de electrificación en la comunidad de Minacachihuancaray.

IV.3 Población y Muestra

IV.3.1 Población

La población para el presente trabajo de investigación viene a ser una vivienda unifamiliar aisladas a la red eléctrica convencional de la comunidad Minacachihuancaray.

IV.3.2 Muestra

Vivienda unifamiliar de la comunidad Minacachihuancaray dedicada a la crianza de gallinas

IV.4 Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información

IV.4.1 Recurso solar en zona de trabajo

En la Tablas 2 se aprecia los datos de radiación solar mensual en 5 años de la comunidad de Minacachihuancaray asimismo en la Tabla 3 se presenta un promedio de los valores mensuales de irradiación solar diaria, temperatura máxima, temperatura mínima y días nublados por semana del área de estudio, la tabla 4 muestra la irradiación solar mensual y diaria junto con la humedad relativa durante el año. Estos datos nos ayudarán a tener resultados más confiables.

Tabla 2 Recurso solar en la comunidad de Minachihuancaray

MES	2019	2020	2021	2022	2023	PROMEDIO
	kWh/m2/mes	kWh/m2/mes	kWh/m2/mes	kWh/m2/mes	kWh/m2/mes	kWh/m2/mes
ENERO	195.61	197.93	179.49	187.27	184.81	189.022
FEBRERO	162.93	166.53	179.33	154.13	156.35	163.854
MARZO	177.44	169.57	167.92	166.23	167.02	169.636
ABRIL	165.84	172.82	157.9	168.42	165.27	166.05
MAYO	168.81	162	161.24	160.99	156.37	161.882
JUNIO	153.69	147.84	145.1	152.87	162.09	152.318
JULIO	169.09	177.16	165.47	171.88	178.37	172.394
AGOSTO	190.43	189.26	180.51	181.86	194.22	187.256
SEPTIEMBRE	190.13	189.78	181.97	199.46	189.29	190.126

OCTUBRE	214.26	215.44	209.31	236.87	207.42	216.66
NOVIEMBRE	191.25	221.42	196.11	224.87	202.09	207.148
DICIEMBRE	194.48	171.52	206.28	205.85	187.34	193.094
ANUAL	2173.96	2181.27	2130.63	2210.70	2150.64	2169.44

Fuente. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS, 2025).

Tabla 3 Datos climatológicos de la comunidad Minacachihuancaray

1	Irradiación (kWh/m2/día)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Días Nublados Por Semana (%)
ENERO	4.92	21.62	2.35	2.96
FEBRERO	5.01	21.46	0.90	0.74
MARZO	4.50	18.51	2.55	1.23
ABRIL	5.00	19.64	0.79	0.13
MAYO	5.01	19.72	0.68	3.90
JUNIO	4.92	20.70	-0.34	3.95
JULIO	5.13	18.72	-3.04	3.61
AGOSTO	5.55	22.86	-2.12	4.56
SEPTIEMBRE	5.18	20.84	2.40	4.87
OCTUBRE	5.92	24.26	1.77	4.16
NOVIEMBRE	5.58	23.97	1.20	4.58
DICIEMBRE	5.12	21.38	2.39	3.47
PROMEDIO	5.15	21.14	0.79	3.18
MÁXIMO	5.92	24.26	2.55	4.87
MÍNIMO	4.50	18.51	-3.04	0.13

Fuente. Elaboración propia a partir de datos de NASA (2025).

Tabla 4 Datos climatológicos obtenidos de NREL

MES	kWh/m2/mes	kWh/m2/día	Humedad Relativa
ENERO	190.08	6.13	74.34

FEBRERO	174.37	6.01	74.67
MARZO	159.72	5.15	78.70
ABRIL	175.19	5.84	76.37
MAYO	180.44	5.82	72.07
JUNIO	162.54	5.42	67.43
JULIO	177.55	5.73	65.69
AGOSTO	201.21	6.49	61.01
SEPTIEMBRE	189.77	6.33	64.48
OCTUBRE	213.51	6.89	63.44
NOVIEMBRE	203.35	6.78	68.13
DICIEMBRE	199.55	6.44	75.87
PROMEDIO	185.61	6.09	70.18
MÁXIMO	213.51	6.89	78.70
MÍNIMO	159.72	5.15	61.01

Fuente. Tabla obtenida de NREL se presentan valores de Irradiación por mes día y Humedad relativa. Adaptado de NREL, 2025, NREL (<https://nsrdb.nrel.gov/>).

IV.4.2 Demanda energética de viviendas

La Tabla 5 presenta la estimación del consumo energético de una vivienda de la comunidad de Minacachihuancaray, considerando los equipos eléctricos de uso más frecuente en el hogar.

Tabla 5 Consumo de energético por equipos de la vivienda

ITEM	DESCRIPCIÓN	Cantidad	Potencia (W)	Horas/Día	Potencia total (W)	Energía Wh/día
1	Iluminación	10 un	18 W	5	180	900
2	Televisor	1 un	150 W	5	150	750
3	Equipo de Sonido	1 un	50 W	12	50	600
4	Refrigeradora	1 un	150 W	8	150	1,200
5	Celular	4 un	20 W	4	80	320
6	Laptop	2 un	20 W	4	40	160

7	Iluminación Gallinero	4 un	10 W	4	40	160
8	Lámparas de crías	2 un	150 W	8	300	2,400
9	Incubadora	1 un	120 W	12	120	1,440
10	Otros (herramientas esporádicas)	1 un	150 W	1	150	150
TOTAL					1,260	8,080

Fuente. Elaboración propia.

IV.4.3 Proveedores y comparativa de tecnologías de los principales componentes fotovoltaicos.

En las tablas 6, 7, 8 y 9 se aprecian la comparativa de tres paneles solares, baterías, controladores e inversores, respectivamente, de acuerdo a su tecnología de fabricación y características de funcionamiento.

Tabla 6 Cuadro comparativo de paneles solares

DESCRIPCIÓN	JA Solar 615W TOPCon N-Type	Tensite 630W Bifacial N-Type	ERA Solar 340W Policristalino
Tipo de célula	Monocristalina bifacial TOPCon	Monocristalina bifacial N-Type MBB half-cut	Policristalina
Potencia	615 W	630 W	340 W
Nro de células	132	132	72 (6×12)
Voltaje en Pmax (Vmp)	~42 V	40.47 V	38.5 V
Corriente en Pmax (Imp)	~14.65 A	15.57 A	8.84 A
Voltaje circuito abierto (Voc)	~49 V	48.80 V	46.4 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	~15.3 A	16.25 A	9.45 A
T° de operación nominal	45 ±2 °C	45 ±2 °C	-40 °C a +85 °C
Dimensiones (mm)	2278 × 1134 × 30 aprox.	2382 × 1134 × 30	1956 × 992 × 40 mm
Peso	~31 kg	32.5 kg	20.9 kg
Tensión máxima del sistema	1500 V	1500 V	1000 V
Garantía producto / potencia	15 / 30 años	15 / 30 años	10 / 25 años
Costo	S/ 335.00	S/ 431.62	S/ 638.32

Fuente. Datos obtenidos del fabricante AutoSolar (2025).

Tabla 7 Cuadro comparativo de baterías

DESCRIPCIÓN	Tensite GEL 12V 300Ah	FLA 48V 300Ah LiFePO ₄
Tipo de tecnología	Plomo-ácido sellada (GEL VRLA)	Litio hierro fosfato (LiFePO ₄)
Voltaje nominal	12 V	48 V
Capacidad nominal (C100)	300 Ah	300 Ah
Energía total (Wh)	3.6 kWh	14.4 kWh
Configuración interna	6 celdas de plomo (2 V cada una)	15 o 16 celdas LiFePO ₄ (3.2 V cada una)
Peso aproximado	67 kg ±3 %	110–130 kg aprox.
Dimensiones (L × A × H)	520 × 268 × 225 mm	650 × 450 × 200 mm (aprox.)
Rango de carga (Bulk / Float)	Bulk: 14.3–14.6 V / Float: 13.6–13.8 V	54.0–56.8 V (dependiendo del BMS)
Corriente de carga recomendada	Máx. 75 A (0.25C)	150 A (0.5C) típica
Resistencia interna	2.0 mΩ	<1.0 mΩ
Temperatura de operación	-15 °C a +40 °C	-20 °C a +60 °C
Eficiencia de carga-descarga	85–90 %	95–98 %
Autodescarga mensual @25°C	3–5 %	<2 %
Vida útil (en flotación)	12–15 años a 20°C	15–20 años
Ciclos de vida @50 % DOD	~1200 ciclos	>6000 ciclos
Ciclos de vida @80 % DOD	~800 ciclos	>4000 ciclos
Costo	S/ 1531.94	S/ 5300.00

Fuente. Datos obtenidos del fabricante AutoSolar (2025).

Tabla 8 Cuadro comparativo de controladores

DESCRIPCIÓN	MUST PC1800A (60A–80A)	MUST PC1500B (10A–60A)	Victron SmartSolar MPPT 150/70
Tipo de tecnología	MPPT	PWM	MPPT
Corriente nominal	60A / 80A	10A, 20A, 30A, 40A, 50A, 60A	60A / 70A

Voltaje del sistema	12 / 24 / 36 / 48 V	12 / 24 / 48 V	12 / 24 / 48 V
Potencia máxima	FV 12V: 940W / 24V: 1880W / 36V: 2820W / 48V: 3760–5000W	12V: 720W / 24V: 1440W / 48V: 2880W	12V: 1000W / 24V: 2000W / 36V: 3000W / 48V: 4000W
Voltaje máximo de entrada FV	145 V	≤100 V	150 V (145 V operación)
Tipo de carga	3 o 4 etapas (LiFePO ₄ , Gel, Plomo-Ácido)	4 etapas (absorción, flotación, ecualización, PWM)	Multietapa adaptativa (8 modos programables)
Eficiencia	98%	85–90 %	>98 %
Temperatura de trabajo	-10 °C a +55 °C	-20 °C a +55 °C	-30 °C a +60 °C
Dimensiones (mm)	315 × 160 × 135	196 × 111 × 54	185 × 250 × 95
Peso aproximado	4.5 Kg	0.4 kg	3 kg
Costo	S/ 844.10	S/ 220.20	S/ 1908.40

Fuente. Datos obtenidos del fabricante AutoSolar (2025).

Tabla 9 Cuadro comparativo de inversores

DESCRIPCIÓN	Tensite 48V	ONE 5.5KW	MUST 5.5KW 48V	PV1800	VHM
Potencia nominal	5500 W (solo batería) / 6500 W (batería + FV)		5500 W		
Potencia pico	11000 VA		11000 W		
Voltaje nominal de batería	48 VDC		48 VDC		
Rango de entrada FV (MPPT)	60–500 VDC		60–130 VDC		
Potencia FV máxima	7500 W		4000 W		
Corriente máxima de carga FV	100 A		80 A		
Corriente de carga CA	100 A		60 A		
Eficiencia	98%		98%		
Frecuencia de salida	50/60 Hz ±0.1 %		50/60 Hz (auto-sensing)		
Tensión de salida CA	220/230/240 VAC ±5 %		220–240 VAC ±5 %		

Capacidad sobrecarga	de 105–200 % (hasta 400 ms)	105–200 % (similar)
Modo de operación	Híbrido (batería + red + solar)	Híbrido fuera de red
Rango de temperatura	-10 a 50 °C	0 a 50 °C
Dimensiones (mm)	565 × 385 × 195	297.5 × 468 × 125
Costo	S/ 1124,96	S/ 3005.42

Fuente. Datos obtenidos del fabricante AutoSolar (2025).

IV.5 Diseño de un sistema fotovoltaico off grid

IV.5.1 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico mediante cálculos matemáticos

Cálculo de cantidad de paneles Solares necesarios para el proyecto

Para dimensionar nuestro generador fotovoltaico se debe tomar en cuenta el PR que es el rendimiento global de la instalación, el rendimiento global depende de las pérdidas en el inversor, sistema de acumulación y otras partes del sistema. A efectos de cálculo vamos a usar en sistemas con inversor y batería PR=0,6 y sistemas con inversor PR=0,7. Para la demanda energética mencionada en la tabla 5, calcularemos la verdadera demanda a usar.

$$Demanda\ Energetica\ Total\ \left(\frac{Wh}{día}\right) = \frac{Demanda\ Energetica\ de\ vivienda}{PR}$$

$$Demanda\ Energetica\ Total\ \left(\frac{Wh}{día}\right) = \frac{8080}{0.6}$$

$$= 13466.67\ Wh/día$$

$$Potencia\ del\ Generador\ FV = \frac{Demanda\ Energetica\ de\ vivienda\ \left(\frac{Wh}{día}\right) / PR}{Hora\ solar\ pico\ \left(\frac{h}{día}\right)}$$

$$= \frac{13466.67}{5.15} = 2614.89W$$

$$= 2614.89W \approx 2615\ W$$

Para poder elegir el panel adecuado para el diseño fotovoltaico, se realizará los cálculos para dos paneles monocristalinos, ya que esta tecnología se adapta mejor a las características geográficas de la región, además que en el mercado ofrece mejor precio calidad en comparación a los policristalinos, ofrecen menor potencia a mayor costo de un monocristalino.

Alternativa 1

Luego de realizar la comparación entre las diferentes tecnologías, tomando en cuenta la tensión sea similar para todos los paneles y una potencia adecuada se procedió a seleccionar como alternativa 1 al panel policristalino al mejor equilibrio entre costo inicial, rendimiento operativo y beneficio a largo plazo, la elección se fundamentó en un análisis técnico-económico (ver Figura 3).

PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN STC						
TIPO	JAM66D45 -605/LB	JAM66D45 -610/LB	JAM66D45 -615/LB	JAM66D45 -620/LB	JAM66D45 -625/LB	JAM66D45 -630/LB
Potencia Nominal Máxima (Pmax) [W]	605	610	615	620	625	630
Voltaje de Circuito Abierto (Voc) [V]	47.90	48.10	48.30	48.50	48.70	48.90
Voltaje de Potencia Máxima (Vmp)) [V]	39.60	39.77	39.96	40.21	40.45	40.70
Corriente de Cortocircuito (Isc)) [A]	16.00	16.05	16.10	16.13	16.15	16.18
Corriente de Potencia Máxima (Imp) [A]	15.28	15.34	15.39	15.42	15.45	15.48
Eficiencia del Módulo [%]	22.4	22.6	22.8	23.0	23.1	23.3
Tolerancia de Potencia	0~+3%					
Coeficiente de temperatura de Isc(α_{Isc})	+0.045%/°C					
Coeficiente de temperatura de Voc (β_{Voc})	-0.250%/°C					
Coeficiente de temperatura de Pmax (γ_{Pmp})	-0.290%/°C					
STC	Irradiancia 1000W/m², temperatura de la celda 25°C, AM1.5G					
Observación: Los datos eléctricos de este catálogo no se refieren a un solo módulo y no forman parte de la oferta. Sólo sirven para comparar diferentes tipos de módulos						

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS CON UN 10% DE IRRADIACIÓN SOLAR						
TIPO	JAM66D45 -605/LB	JAM66D45 -610/LB	JAM66D45 -615/LB	JAM66D45 -620/LB	JAM66D45 -625/LB	JAM66D45 -630/LB
Potencia Nominal Máxima (Pmax) [W]	653	659	664	670	675	680
Tensión de Circuito Abierto (Voc) [V]	47.90	48.10	48.30	48.50	48.70	48.90
Voltaje de Potencia Máxima (Vmp)[V]	39.60	39.77	39.96	40.21	40.45	40.70
Corriente de Cortocircuito (Isc)) [A]	17.28	17.33	17.39	17.42	17.44	17.47
Corriente de Potencia Máxima (Imp) [A]	16.50	16.56	16.62	16.65	16.69	16.72
Ratio Irradiación (trasero/frontal)	10%					
*Para las instalaciones de Nextracker, carga estática máxima, por favor tome como referencia la carta de aprobación de compatibilidad entre JA Solar y Nextracker						

Figura 3 Características técnicas del panel fotovoltaico Monocristalino.
Ficha técnica adaptado de AutoSolar (2025).

Temperatura máxima de operación de las celdas

- $$T_{cm\acute{a}x} = T_a + Gx \frac{T_{NOCT}-20}{800}$$

$$T_{cm\acute{a}x} = 21.14 + 1000x \frac{45 - 20}{800} = 52.39 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{cm\acute{a}x} = 52.39 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Con la temperatura máxima de operación calculamos las variaciones de potencia, corriente y voltaje

- $$\Delta P_{m\acute{a}x} = (T_{m\acute{a}x} - 25) ^{\circ}\text{C} * Coef. T_{pm\acute{a}x} \% / ^{\circ}\text{C} = -7.94\%$$

$$\Delta P_{m\acute{a}x} = (52.39 - 25) \times -0.290$$

$$\Delta P_{m\acute{a}x} = -7.94\%$$

- $$\Delta V_{oc} = (T_{cmin} - 25) ^{\circ}\text{C} * Coef. TV_{oc} \% / ^{\circ}\text{C} = 7.01\%$$

$$\Delta V_{oc} = (-3.04 - 25) \times -0.25$$

$$\Delta V_{oc} = 7.01\%$$

- $$\Delta I_{sc} = (T_{cm\acute{a}x} - 25) ^{\circ}\text{C} * Coef. TI_{sc} \% / ^{\circ}\text{C} = 1.23\%$$

$$\Delta I_{sc} = (52.39 - 25) \times 0.045$$

$$\Delta I_{sc} = 1.23\%$$

Con los valores obtenidos podemos hallar los valores corregidos de potencia, voltaje y corriente

- $$Pot. \acute{m}ax \text{ corregida} = P_{m\acute{a}x} \left(1 + \frac{\Delta P_{m\acute{a}x}}{100} \right)$$

$$Pot. \acute{m}ax \text{ corregida} = 615 \left(1 + \frac{(-7.94)}{100} \right)$$

$$Pot. \acute{m}ax \text{ corregida} = 566.17 \text{ W}$$

- $$V_{oc} \text{ corregido} = V_{oc} \left(1 + \frac{\Delta V_{oc}}{100} \right) = 99.99V$$

$$V_{oc} \text{ corregido} = 48.3 \left(1 + \frac{7.01}{100} \right)$$

$$V_{oc, corregido} = 99.99V$$

- $I_{sc, corregido} = I_{sc} \left(1 + \frac{I_{sc}}{100} \right) = 16.3 A$

$$I_{sc, corregido} = 16.10 \left(1 + \frac{1.23}{100} \right)$$

$$I_{sc, corregido} = 16.3 A$$

Cantidad de paneles solares

$$Cantidad\ de\ Paneles\ Solares = \frac{Pot.\ del\ Sistema}{Potencia\ del\ Panel}$$

$$Cantidad\ de\ Paneles\ Solares = \frac{2615}{562.74} = 4.65 \approx 6$$

Cantidad de paneles solares en serie

$$N^{\circ}Ps = \frac{V_{nom}}{V_{pm}}$$

$$N^{\circ}Ps = \frac{48 V}{39.96V} = 1.2 \approx 2$$

Cantidad de paneles solares en paralelo

$$N^{\circ}Pp = \frac{Pot.\ del\ sistema}{Potencia\ del\ panel \times N^{\circ}Ps}$$

$$N^{\circ}Pp = \frac{2615}{562.74 \times 2} = 2.32 \approx 3$$

De acuerdo a los cálculos realizados y la potencia demandada, se necesitan 2 paneles en serie y 3 en paralelo, con lo cual contaremos con 6 paneles y una potencia total de 3376.44 W.

Alternativa 2

Como segunda alternativa escogeremos un panel monocristalino (ver Figura 4).

Datos Eléctricos STC		EM630-PH
Máxima potencia (P _{max} /W)		630W
Corriente de potencia máxima (I _{mp})		15,57A
Voltaje de potencia máxima (V _{mp})		40,47V
Corriente de cortocircuito (I _{sc})		16,25A
Voltaje de circuito abierto (V _{oc})		48,80V
Eficiencia del módulo		23,32%
Condiciones de prueba estándar		1000 W/m ² , 25 °C, AM 1.5
Tensión máxima del sistema		1500V/DC
Coeficiente de temperatura I _{sc}		0,043% / °C
Coeficiente de temperatura V _{oc}		-0,24% / °C
Coeficiente de temperatura P _{mp}		-0,30% / °C
Rango temperatura funcionamiento		-40°C / +85°C
Temperatura operación célula (TONC)		45±2 °C
*Condiciones Estandar de Medida STC: Irradiación 1.000 W/m2, espectro AM1.5, célula a 25°C.		
Valores en condiciones TONC**		
Potencia máxima (P _{max} /W)		492W
Voltaje de potencia máxima (V _{mp} TONC)		41,21V
Corriente de potencia máxima (I _{mp} TONC)		11,72A
Voltaje de circuito abierto (V _{oc} TONC)		49,94V
Corriente de cortocircuito (I _{sc} TONC)		12,14A
**Condiciones TONC: Irradiación de 800 W/m2, AM1.5, temperatura ambiente 20 °C y viento de 1 m/s.		

Figura 4 Características técnicas del panel fotovoltaico monocristalino.
Ficha técnica adaptado de AutoSolar (2025).

Temperatura máxima de operación de las celdas

$$\begin{aligned}
 T_{cm\acute{a}x} &= T_a + Gx \frac{T_{NOCT}-20}{800} \\
 T_{cm\acute{a}x} &= 21.14 + 1000x \frac{45 - 20}{800} = 52.39 \text{ }^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

Con la temperatura máxima de operación calculamos las variaciones de potencia, corriente y voltaje

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad \Delta P_{m\acute{a}x} &= (T_{m\acute{a}x} - 25) ^{\circ}\text{C} * Coef. T_{p_{m\acute{a}x}} \% / ^{\circ}\text{C} \\
 \Delta P_{m\acute{a}x} &= (52.39 - 25) \times -0.300 \\
 \Delta P_{m\acute{a}x} &= -8.23\% \\
 \bullet \quad \Delta V_{oc} &= (T_{cmin} - 25) ^{\circ}\text{C} * Coef. T_{V_{oc}} \% / ^{\circ}\text{C} \\
 \Delta V_{oc} &= (-3.04 - 25) \times -0.24 \\
 \Delta V_{oc} &= 6.72\%
 \end{aligned}$$

- $\Delta I_{sc} = (T_{cm\acute{a}x} - 25)^\circ C * Coef.TI_{sc}\%/^\circ C$

$$\Delta I_{sc} = (52.39 - 25) \times 0.043$$

$$\Delta I_{sc} = 1.18\%$$

Con las variaciones de potencia, corriente y voltaje podemos hallar los valores reales:

- $Pot.m\acute{a}x\ corregida = P_{m\acute{a}x} \left(1 + \frac{\Delta P_{m\acute{a}x}}{100}\right)$

$$Pot.m\acute{a}x\ corregida = 630 \left(1 + \frac{(-8.23)}{100}\right)$$

$$Pot.m\acute{a}x\ corregida = 578.15\ W$$

- $Voc.corregido = Voc \left(1 + \frac{\Delta Voc}{100}\right)$

$$Voc.corregido = 48.8 \left(1 + \frac{6.72}{100}\right)$$

$$Voc.corregido = 52.07\ V$$

- $Isc.corregido = I_{sc} \left(1 + \frac{I_{sc}}{100}\right)$

$$Isc.corregido = 16.25 \left(1 + \frac{1.18}{100}\right)$$

$$Isc.orregido = 16.44\ A$$

Cantidad de paneles solares

$$Cantidad\ de\ Paneles\ Solares = \frac{Pot.\ del\ Sistema}{Potencia\ del\ Panel}$$

$$Cantidad\ de\ Paneles\ Solares = \frac{2615}{578.15} = 4.52 \approx 6$$

Cantidad de paneles solares en serie

$$N^\circ Ps = \frac{V_{nom}}{V_{pm}}$$

$$N^{\circ}Ps = \frac{48 V}{40.47 V} = 1.18 \approx 2$$

Cantidad de paneles solares en paralelo

$$N^{\circ}Pp = \frac{Pot. del sistema}{Potencia del panel \times N^{\circ}Ps}$$

$$N^{\circ}Pp = \frac{2615}{578.15 \times 2} = 2.26 \approx 3$$

De acuerdo a los cálculos realizados y la potencia demandada, se necesitan 2 paneles en serie y 3 en paralelo, con lo cual contaremos con 6 paneles y una potencia total de 3468.9 W.

A partir del cuadro comparativo (Tabla 6) se analizan tres alternativas de módulos fotovoltaicos con distintas tecnologías y potencias nominales: JA Solar 615 W TOPCon N-Type, Tensite 630 W bifacial N-Type y ERA Solar 340 W monocristalino. Se observa que los dos primeros corresponden a tecnologías de última generación (tipo N), con mayores eficiencias, menor degradación anual y mejor comportamiento frente a altas temperaturas en comparación con el panel policristalino, el cual presenta una menor potencia y eficiencia, siendo una tecnología más antigua. Asimismo, aunque el panel Tensite ofrece una potencia ligeramente superior y la ventaja del efecto bifacial, su desempeño real depende en gran medida de las condiciones de instalación, como el albedo del suelo y el diseño estructural, factores que no siempre pueden optimizarse en la zona de estudio.

En función de estas consideraciones, se eligió el panel JA Solar 615 W TOPCon N-Type como la mejor opción para la zona seleccionada, ya que ofrece un equilibrio óptimo entre alta potencia, elevada eficiencia y confiabilidad operativa. Esta tecnología presenta menores pérdidas por temperatura y una degradación más baja a lo largo del tiempo, lo que resulta especialmente favorable en zonas con alta radiación solar y temperaturas elevadas, asegurando una mayor producción energética anual y una vida útil más estable del sistema.

Además, su potencia unitaria permite reducir la cantidad de módulos requeridos, optimizando el uso del espacio disponible y disminuyendo costos asociados a estructuras, cableado e instalación, lo que respalda técnica y económicamente su selección frente a las otras alternativas evaluadas.

El módulo de JA Solar utiliza tecnología bifacial TOPCon de tipo N, que proporciona una mayor eficiencia, menor degradación inicial y un mejor rendimiento bajo altas temperaturas en comparación con tecnologías tradicionales. También ofrece una garantía de rendimiento lineal durante 30 años y es de un fabricante clasificado como Tier 1, que es reconocido a nivel mundial por la calidad y fiabilidad de sus productos.

Cálculo del sistema de acumulación de energía

$$Capacidad\ Bateria\ (Ah) = \frac{Demanda\ Energetica\ Total \times Dias\ de\ autonomia}{V\ sistema \times PD}$$

$$Capacidad\ Bateria\ (Ah) = \frac{13466.67 \times 0.5}{48 \times 0.6} = 233.8Ah$$

Opción 1

D

Cantidad de baterías de serie:

$$Cant. Bat. Serie = \frac{V\ sistema}{V\ bateria} = \frac{48\ V}{12\ V} = 4$$

Cantidad de baterías en paralelo:

$$Cant. Bat. Paralelo = \frac{Capacidad\ bateria\ (Ah)}{Cap. Bateria\ elegida\ (Ah)} = \frac{233.8}{300} = 0.81 \approx 1$$

Calculo de años de vida:

$$\# años\ de\ vida = \frac{1200}{365 \frac{ciclos}{año}} = 3.3 años$$

Opción 2

Cantidad de baterías de serie:

$$Cant. Bat. Serie = \frac{V sistema}{V bateria} = \frac{48}{48} = 1$$

Cantidad de baterías en paralelo:

$$Cant. Bat. Paralelo = \frac{Capacidad bateria (Ah)}{Cap. Bateria elegida (Ah)} = \frac{233.8}{300} = 0.81 \approx 1$$

Cálculo de años de vida:

$$\# años de vida = \frac{6000}{365 \frac{ciclos}{año}} = 16.4 años$$

Tras comparar las fichas técnicas y realizar los cálculos de demanda energética, se determinó que la batería de litio (LiFePO₄) es la opción más eficiente para el sistema fotovoltaico, ya que con una sola unidad cubre la carga requerida, mientras que con baterías de GEL se necesitarían cuatro. Esto se debe a que la batería de litio ofrece una mayor profundidad de descarga, mayor eficiencia, más ciclos de vida útil, menor peso y mejor rendimiento térmico, lo que optimiza el sistema tanto técnica como económicamente frente a la tecnología de GEL.

Dimensionamiento del controlador de Carga

$$Cap. controlador de carga = 16.3 * 3 \times 1.25 = 61.125 A$$

Dimensionamiento del inversor

$$P inversor = \sum P_{AC} \times FS = 1260 \times 0.85 = 1071 W$$

Conociendo la potencia efectiva que debe tener el inversor se tiene que elegir la tecnología que más se adecue al sistema, revisando la tabla 9, comparación de tecnologías, se opta por el inversor Tensite ONE 5.5KW 48V, este inversor posee una potencia nominal desde batería 5.5 KW y una potencia máxima de 6,5KW con apoyo de FV/batería, cubre adecuadamente la demanda calculada, el inversor Tensite tiene incorporado el controlador de carga solar MPPT.

Dimensionamiento de los conductores

$$S = \frac{2 \times \rho \times L \times I}{\%(Va - Vb)}$$

En la figura 14 se observa los resultados de los cálculos de conductores.

Cálculo de la distancia entre paneles para evitarlas sombras

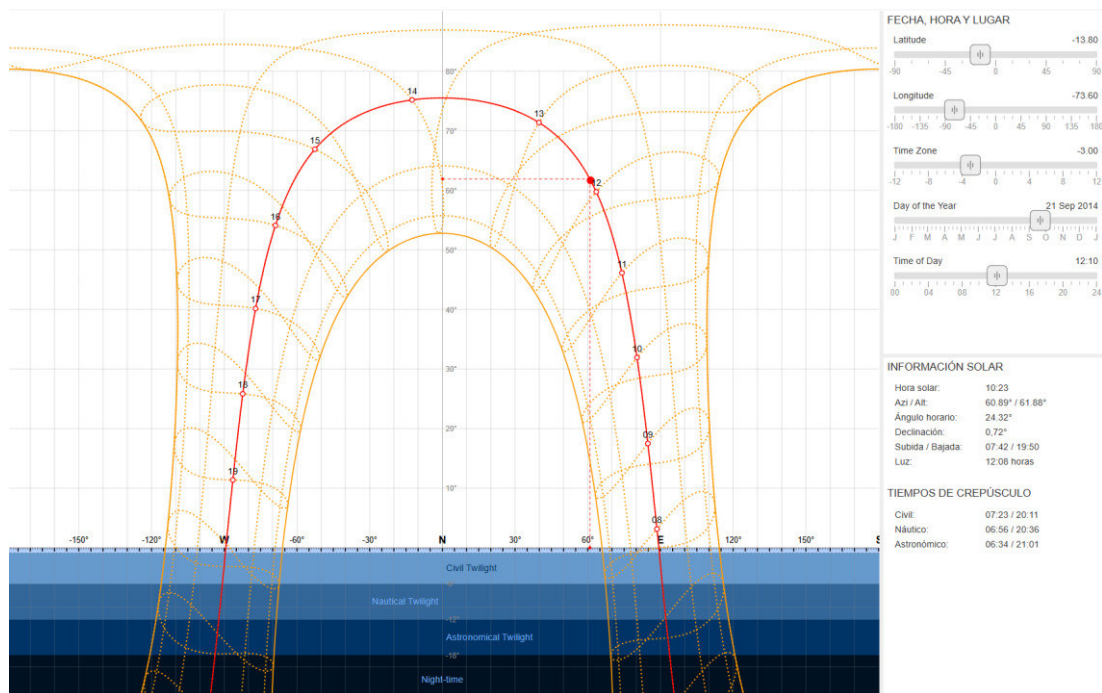


Figura 5 Carta solar de la comunidad de Minacachihuancaray. Adaptado de 2D Sun-Path, Marsh, A. J. (2014). Andrewmarsh (<https://andrewmarsh.com/apps/releases/sunpath2d.html>).

Para realizar este cálculo se hará uso de la siguiente formula, apoyado de los datos obtenidos de la carta solar de la Zona.

$$Ds = \frac{2.278 \times \sin 15^\circ \times \cos 60.89^\circ}{\tan 61.88} = 0.15 \text{ m}$$

Para la instalación real, se añade el factor de seguridad de 15%, con ello tenemos una distancia total de 0.175m

Área aproximada que ocupará el sistema fotovoltaico

La ficha técnica de este panel indica las siguientes dimensiones 2.278 x 1134x 30 mm, con estos datos podemos calcular el área ocupada.

$$\text{Área aprox} = (2.278 \times 1.134) \times 6 + (0.175 \times 1.134) \times 4 = 16.29 \text{ m}^2$$

Dimensionamiento del sistema fotovoltaico usando el software PVsyst

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico off-grid, ahora pasaremos hacer uso del programa PVsyst, en la versión 7.4, este software nos ayudara a contrastar los valores obtenidos mediante cálculos matemáticos como se muestran en las Figuras 6, 7, 8, 9 y 10.

	Irradiación horizontal global	Irradiación difusa horizontal	Temperatura	Velocidad del viento	Turbidez Linke	Humedad relativa
	kWh/m ² /día	kWh/m ² /día	°C	m/s	[-]	%
Enero	7.94	2.37	11.9	1.60	2.938	67.9
Febrero	7.37	2.14	11.8	1.69	2.858	70.0
Marzo	7.27	2.21	11.8	1.70	2.908	69.0
Abril	6.77	1.52	11.3	1.59	2.664	65.9
Mayo	6.55	1.53	10.2	1.50	2.607	59.1
Junio	6.26	1.33	9.0	1.40	2.568	55.8
Julio	6.41	1.22	8.8	1.50	2.619	53.6
Agosto	6.19	1.74	10.1	1.70	2.904	51.5
Septiembre	6.37	2.09	11.2	1.90	3.214	54.5
Octubre	7.08	2.19	12.3	2.00	3.075	56.4
Noviembre	7.90	2.12	12.8	1.99	2.935	57.6
Diciembre	8.02	1.93	12.1	1.90	3.013	64.1
Año	7.01	1.87	11.1	1.7	2.859	60.4

Irradiación horizontal global variabilidad año a año 12.5%

Figura 6 Irradiación solar Anual. Elaboración propia adaptado de datos de la radiación solar obtenidos en software PVsyst.

Consumos diarios						
Número	Aparato	Potencia	Uso diario	Distrib. por hora	Daily energy	
10	Lámparas (LED o fluo)	18 W/lámpara	5.0 h/día	OK	900 Wh	
6	PC / móvil	16 W/apar.	5.0 h/día	OK	480 Wh	
2	TV/Equipo de sonido	56 W/apar.	12.0 h/día	OK	1351 Wh	
1	Refrigeradora	1.20 kWh/día	8.0	OK	1200 Wh	
4	Iluminación gallinero	10.0 W prom	4.0 h/día	OK	160 Wh	
2	Lampara de Crias	150 W/apar.	8.0 h/día	OK	2400 Wh	
1	Incubadora	120 W/apar.	12.0 h/día	OK	1440 Wh	
Consumidores en espera		6 W tot	24 h/día		151 Wh	
Energía diaria total					8082 Wh/día	
Energía mensual					242.5 kWh/mes	

Figura 7 Consumo energético de equipos. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de software PVsyst.

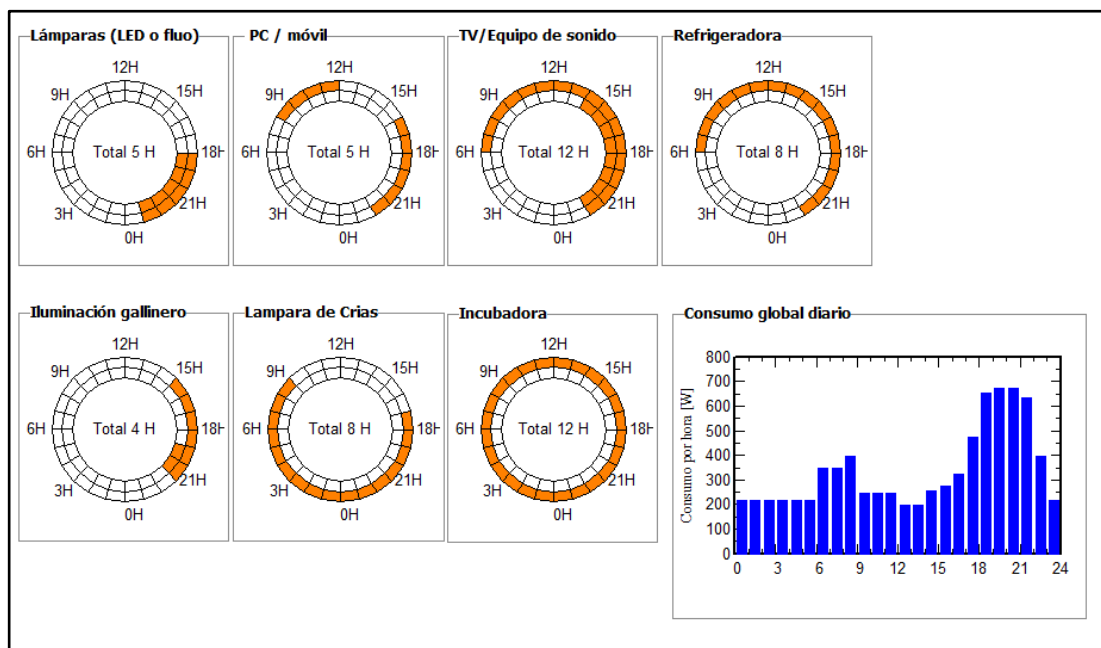


Figura 8 Distribución de Consumos diarios para el año. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de software PVsyst.

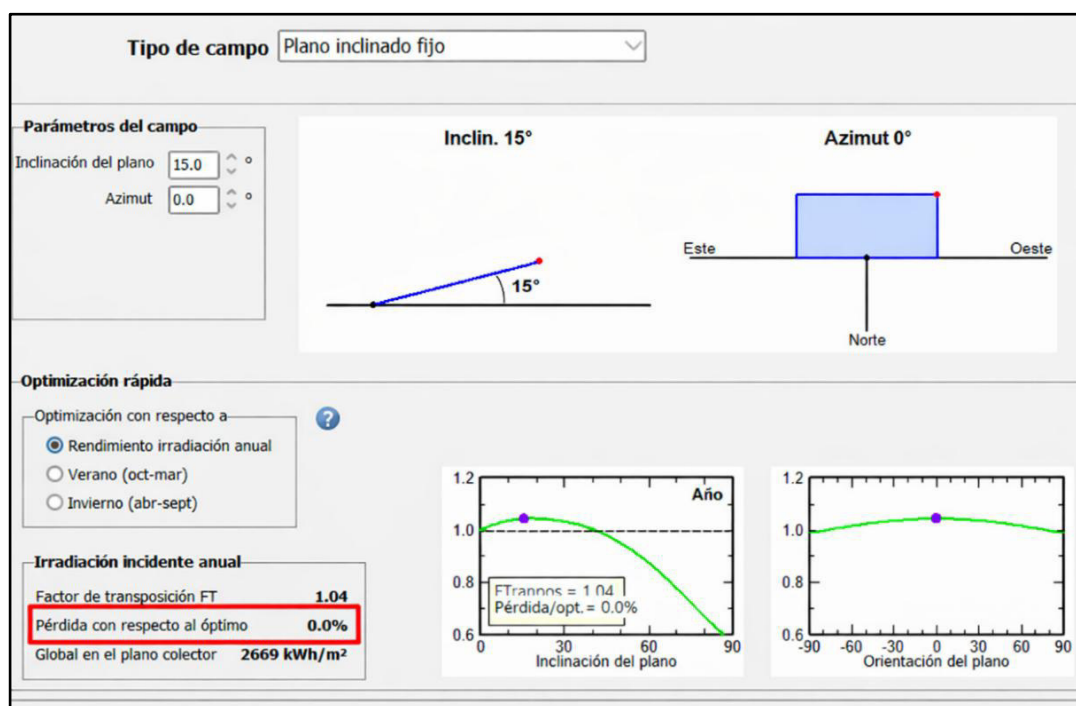


Figura 9 Inclinación óptima de panel fotovoltaico. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de software PVsyst.

Balances y resultados principales								
	GlobHor	GlobEff	E_Avail	EUnused	E_Miss	E_User	E_Load	SolFrac
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	proporción
Enero	246.3	213.5	684.0	420.1	0.000	250.6	250.6	1.001
Febrero	206.4	188.4	594.8	356.1	0.000	226.3	226.3	1.001
Marzo	225.5	221.9	692.4	428.1	0.000	250.6	250.6	1.002
Abril	203.1	213.7	675.7	420.9	1.522	241.0	242.5	0.995
Mayo	203.0	225.8	716.2	450.2	0.000	250.6	250.6	1.002
Junio	187.7	215.4	689.8	431.9	0.000	242.5	242.5	1.001
Julio	198.7	225.7	724.0	457.4	0.000	250.6	250.6	1.001
Agosto	191.8	204.6	652.9	387.0	0.000	250.6	250.6	1.001
Septiembre	191.0	190.6	606.8	350.9	0.000	242.5	242.5	1.001
Octubre	219.5	206.0	655.1	391.0	0.000	250.6	250.6	1.001
Noviembre	237.0	209.8	661.5	406.7	0.000	242.5	242.5	1.001
Diciembre	248.7	211.7	679.0	415.4	0.000	250.6	250.6	1.001
Año	2558.7	2527.2	8032.3	4915.7	1.522	2948.6	2950.1	1.001

Legendas

GlobHor

Global efectivo, corr. para IAM y sombreados

E_Avail

EUnused

E_Miss

Irradiación horizontal global

Energía solar disponible

Energía no utilizada (batería llena)

Energía faltante

E_User

E_Load

SolFrac

Energía suministrada al usuario

Necesidad energética del usuario (Carga)

Fracción solar (EUtilizada / ECarga)

Figura 10 Resultados de simulación en PVsyst. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de software PVsyst.

El sistema fotovoltaico off-grid muestra una generación anual muy superior a la demanda del usuario, con 8032 kWh de energía disponible frente a 2948 kWh consumidos, lo que provoca que más del 60% de la producción no pueda utilizarse debido a limitaciones de almacenamiento. A pesar de ello, el sistema presenta una autonomía casi total, con apenas 1.5 kWh de energía faltante en todo el año y una fracción solar cercana a 1 en todos los meses, indicando que la instalación está sobredimensionada en generación, pero garantiza una cobertura prácticamente completa de la carga.

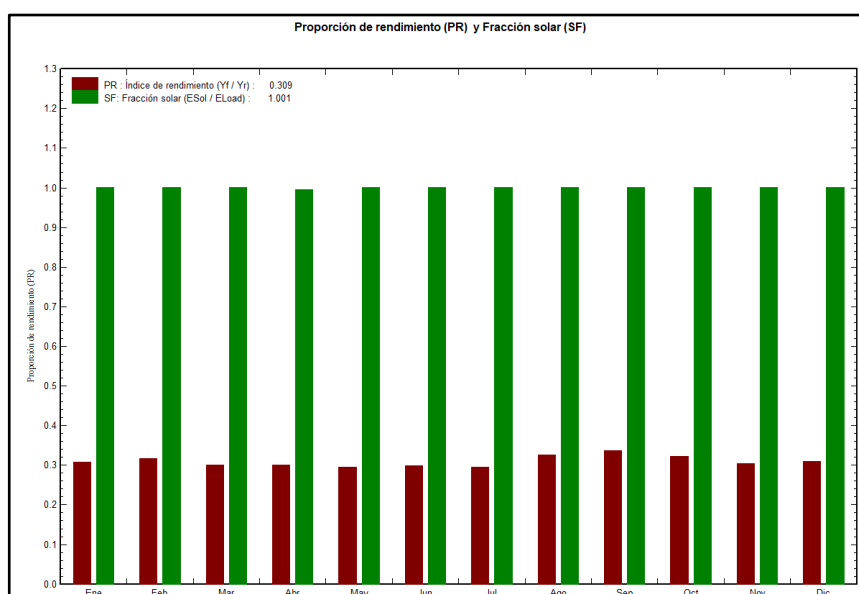


Figura 11 Gráfica de proporción de rendimiento vs fracción solar. Elaboración propia.

La Figura 11 muestra que el sistema fotovoltaico off-grid mantiene una fracción solar cercana a 1 durante todo el año, lo que indica que la instalación cubre completamente la demanda del usuario en cada mes. Sin embargo, el índice de rendimiento se mantiene alrededor de 0.30, reflejando que una gran parte de la energía generada no se aprovecha debido a limitaciones de almacenamiento y a un consumo menor que la producción disponible. En conjunto, la interpretación evidencia que, aunque el sistema está sobredimensionado en capacidad de generación, garantiza una autonomía total y un suministro energético continuo para la carga.

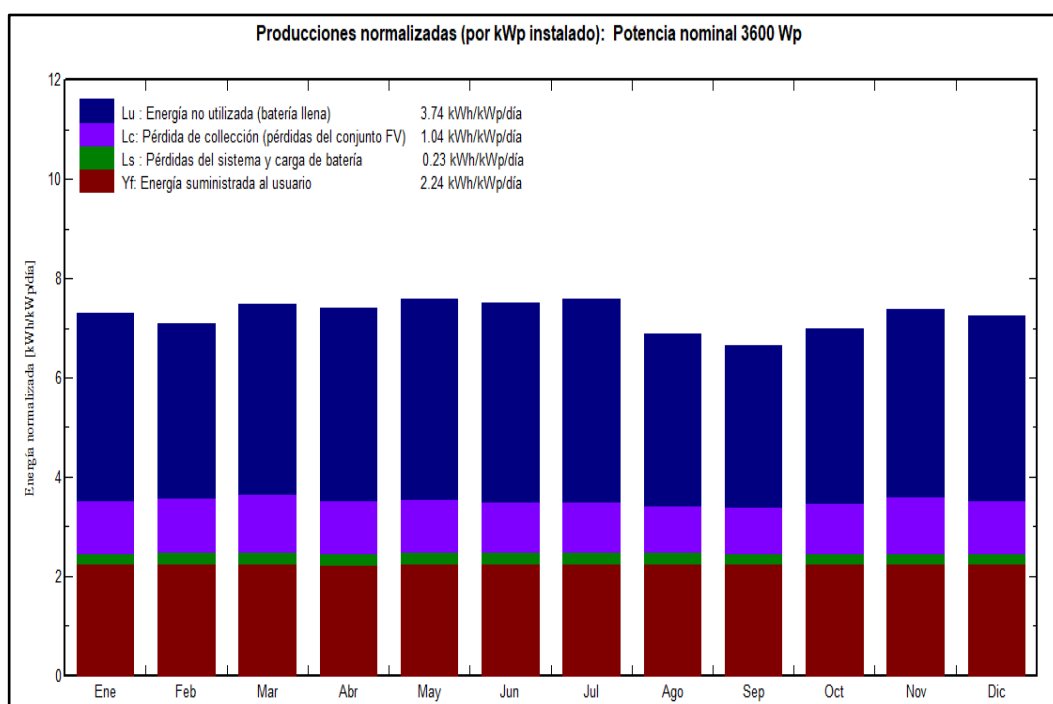


Figura 12 Gráfica de producción normalizada y potencia nominal. Elaboración propia.

La gráfica (Figura 12) muestra que la producción normalizada del sistema fotovoltaico off-grid por kWp instalado presenta una alta proporción de energía no utilizada debido a la frecuente saturación de la batería, representada por el bloque azul que supera ampliamente a la energía efectivamente entregada al usuario. Las pérdidas del conjunto fotovoltaico y las pérdidas del sistema y de carga de la batería aparecen como fracciones menores, lo que indica que el equipo opera adecuadamente en términos técnicos, pero que la capacidad de almacenamiento resulta insuficiente frente a la generación disponible. En conjunto, la representación evidencia un

sistema sobredimensionado en producción, en el que gran parte de la energía generada se desperdicia, aunque mantiene un suministro estable y confiable para la demanda del usuario.

IV.6 Análisis comparativo entre energía convencional y energía fotovoltaica en zonas rurales

Con el fin de sustentar la selección del sistema fotovoltaico off-grid como alternativa energética frente a otras energías para la zona de estudio, se realizó un análisis comparativo entre la energía convencional y la energía fotovoltaica aplicada a contextos rurales. En la Tabla 10 se presentan las principales ventajas del sistema fotovoltaico, considerando criterios técnicos, económicos, operativos y ambientales. Este análisis permite identificar las limitaciones asociadas al uso de la energía convencional en zonas rurales y resaltar los beneficios de la energía solar fotovoltaica como una solución viable, sostenible y adecuada para comunidades aisladas de la red eléctrica nacional.

Tabla 10 Energía Convencional vs Energía Fotovoltaica (Zona Rural)

Criterio	Energía Convencional (Red eléctrica)	Energía Fotovoltaica (Solar)
Disponibilidad en zonas rurales	Limitada o inexistente; extensión de red costosa y lenta	Alta, independiente de la red eléctrica
Costo de instalación	Alto (postes, líneas, subestaciones, transporte)	Inversión inicial moderada
Costo operativo	Elevado (tarifas, mantenimiento continuo)	Muy bajo (energía solar gratuita)
Confiabilidad del suministro	Frecuentes interrupciones y variaciones de tensión	Estable con sistema bien dimensionado
Impacto ambiental	Emisiones de CO ₂ , ruido y contaminación	Energía limpia y renovable
Mantenimiento	Alto, requiere personal especializado y repuestos	Bajo, mantenimiento básico
Escalabilidad	Difícil y costosa de ampliar	Modular y fácil de ampliar

Criterio	Energía Convencional (Red eléctrica)	Energía Fotovoltaica (Solar)
Dependencia externa	Alta dependencia de red	Autonomía energética
Tiempo de implementación	Largo (meses o años)	Corto (semanas)
Adecuación al entorno rural	Poco adaptable a zonas aisladas	Ideal para zonas rurales

Fuente. Elaboración propia.

El acceso a la energía eléctrica constituye un factor clave para el desarrollo social y económico de las comunidades rurales. Sin embargo, en muchas zonas alejadas del país, la electrificación mediante sistemas convencionales presenta serias limitaciones técnicas y económicas que dificultan su implementación y sostenibilidad en el tiempo. En este contexto, la energía fotovoltaica surge como una alternativa estratégica frente a la extensión de la red eléctrica convencional, especialmente en áreas con baja densidad poblacional y condiciones geográficas adversas.

Desde el punto de vista económico, uno de los principales obstáculos de la energía convencional en zonas rurales es el alto costo de extensión de la red eléctrica. La instalación de postes, líneas de transmisión, subestaciones y sistemas de protección implica inversiones elevadas que, en muchos casos, no se justifican debido al reducido número de usuarios beneficiados. Además, estos costos se incrementan significativamente cuando las comunidades se encuentran en zonas montañosas, de difícil acceso o alejadas de los centros urbanos, como ocurre en gran parte del ámbito rural peruano. En contraste, los sistemas fotovoltaicos off-grid requieren una inversión inicial concentrada principalmente en los equipos y su instalación, sin necesidad de infraestructura extensa, lo que los convierte en una opción económicamente más viable para este tipo de escenarios.

En términos de confiabilidad del suministro, la energía convencional en zonas rurales suele presentar interrupciones frecuentes, caídas de tensión y tiempos prolongados de reposición del servicio, debido a la lejanía de los centros de mantenimiento y a la vulnerabilidad de las líneas de distribución

frente a fenómenos climáticos. Esta situación afecta directamente la calidad de vida de los usuarios y limita el desarrollo de actividades productivas y educativas. Por el contrario, un sistema fotovoltaico correctamente dimensionado y con almacenamiento energético proporciona un suministro eléctrico estable y continuo, independiente de la red nacional, lo que garantiza autonomía energética y mayor seguridad en el abastecimiento, especialmente en comunidades aisladas.

Otro aspecto relevante es el costo operativo y de mantenimiento. La energía convencional implica pagos periódicos por consumo eléctrico. Estos costos suelen ser elevados e impredecibles, afectando la economía familiar de los usuarios rurales. En cambio, los sistemas fotovoltaicos presentan costos operativos bajos, ya que la fuente de energía es gratuita y renovable. El mantenimiento se limita principalmente a la limpieza de los paneles y a revisiones periódicas de los componentes, lo que reduce significativamente los gastos a lo largo de la vida útil del sistema.

Desde el enfoque de la sostenibilidad técnica y ambiental, la energía convencional basada en combustibles fósiles genera emisiones contaminantes, ruido y riesgos asociados al manejo de hidrocarburos, lo cual resulta incompatible con los principios de desarrollo sostenible y protección ambiental. La energía fotovoltaica, en cambio, es una fuente limpia y renovable que no produce emisiones durante su operación, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono y al cuidado del entorno natural. Asimismo, la modularidad de los sistemas solares permite su ampliación futura de acuerdo con el crecimiento de la demanda energética, sin requerir modificaciones complejas en la infraestructura existente.

En síntesis, el análisis comparativo evidencia que la energía convencional presenta importantes limitaciones en zonas rurales, principalmente asociadas a los elevados costos de infraestructura, baja confiabilidad del servicio y altos gastos operativos. Por el contrario, la energía fotovoltaica se posiciona como una alternativa técnica y económicamente sostenible, capaz de garantizar el acceso a la electricidad de forma autónoma, confiable y ambientalmente responsable. Estas características justifican la selección del sistema fotovoltaico off-grid como la opción más adecuada para

la zona de estudio, sentando las bases para el diseño, dimensionamiento y evaluación económica desarrollados en los siguientes apartados de la investigación.

IV.7 Diagrama unifilar del sistema Fotovoltaico off grid y dimensionamiento de conductores

En la figura 13 se muestra el diagrama unifilar del diseño final del sistema fotovoltaico off- grid, donde se aprecia los 6 paneles, con un arreglo de 2 en serie y 3 en paralelo, un inversor de la marca tensite de 5.5KW el cual tiene incorporado un regular de carga tipo MPPT capaz de aprovechar de manera más eficiente la energía disponible, especialmente en condiciones variables de irradiación y temperatura, una batería de litio ferrofosfato (LiFePO_4) el cual ofrece un tiempo de vida de aproximadamente 16 años. En la figura 14 se tiene el dimensionamiento de los conductores en el cual se usó la formula $S = \frac{2 \times \rho \times L \times I}{\% (V_a - V_b)}$ para cálculo de la caída de tensión.

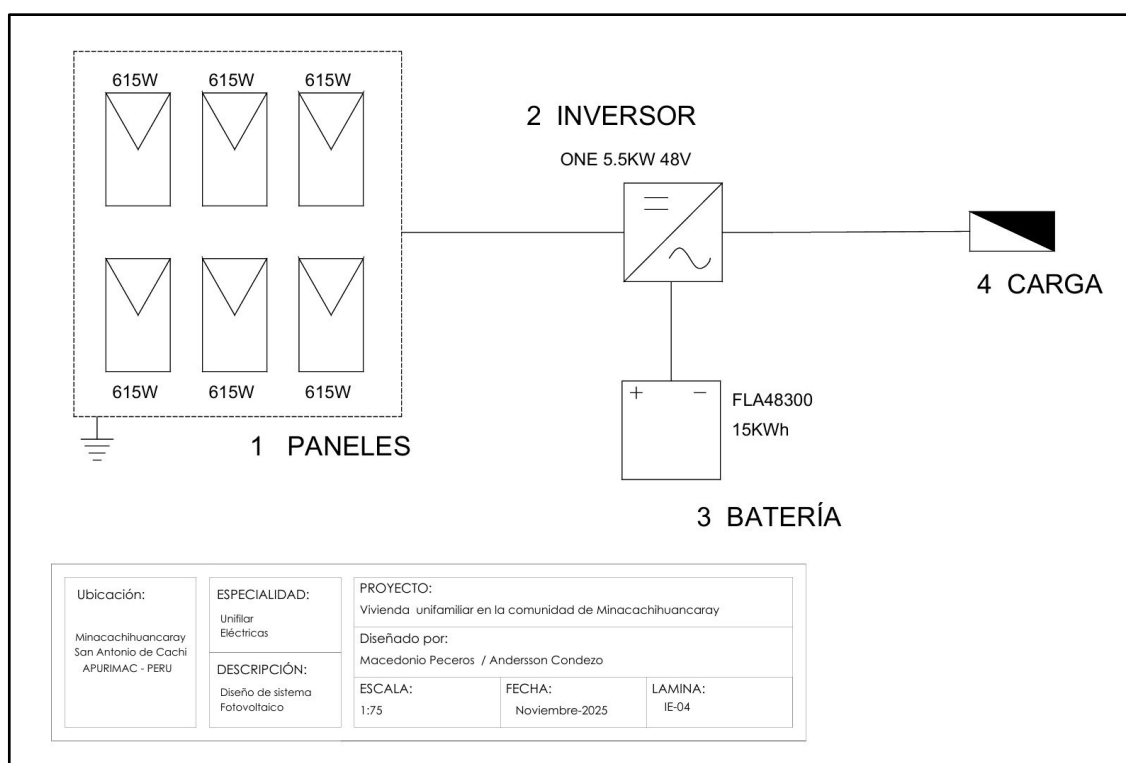


Figura 13 Unifilar del sistema Fotovoltaico off-grid. Elaboración propia.

Selección de Conductores						Fecha	01.08.2025
Proyecto : Vivienda Unifamiliar						Revisado	M.P.M
Propietario : Gloria Mallma						Archivo	
						Página	1
CONEXIÓN DE COMPONENTES	VOLTAJE NOMINAL	$I(n)$	$I(d)$	$FCT (Cu)$ $\Omega \cdot mm^2/m$	LONGITUD (m)	SECCIÓN (mm ²)	CAIDA DE TENSIÓN ($<2.5\%$)
GENERADOR - INVERSOR	48.00V	48.30 A	60.38 A	0.0175	20	25	2%
INVERSOR - BATERIA	48.00V	46.30 A	57.88 A	0.0175	2	35	0.25%

Figura 14 Selección de conductores. Elaboración propia.

IV.8 Plano arquitectónico y eléctrico de vivienda

En la presente sección se presentan los planos arquitectónicos (Figura 15), eléctricos (Figura 16, 17,18) propuestos para la vivienda, los cuales forman parte del diseño técnico del proyecto. Estos planos y diagramas nos proporcionan una visión integral del sistema Eléctrico diseñado para una futura implementación.

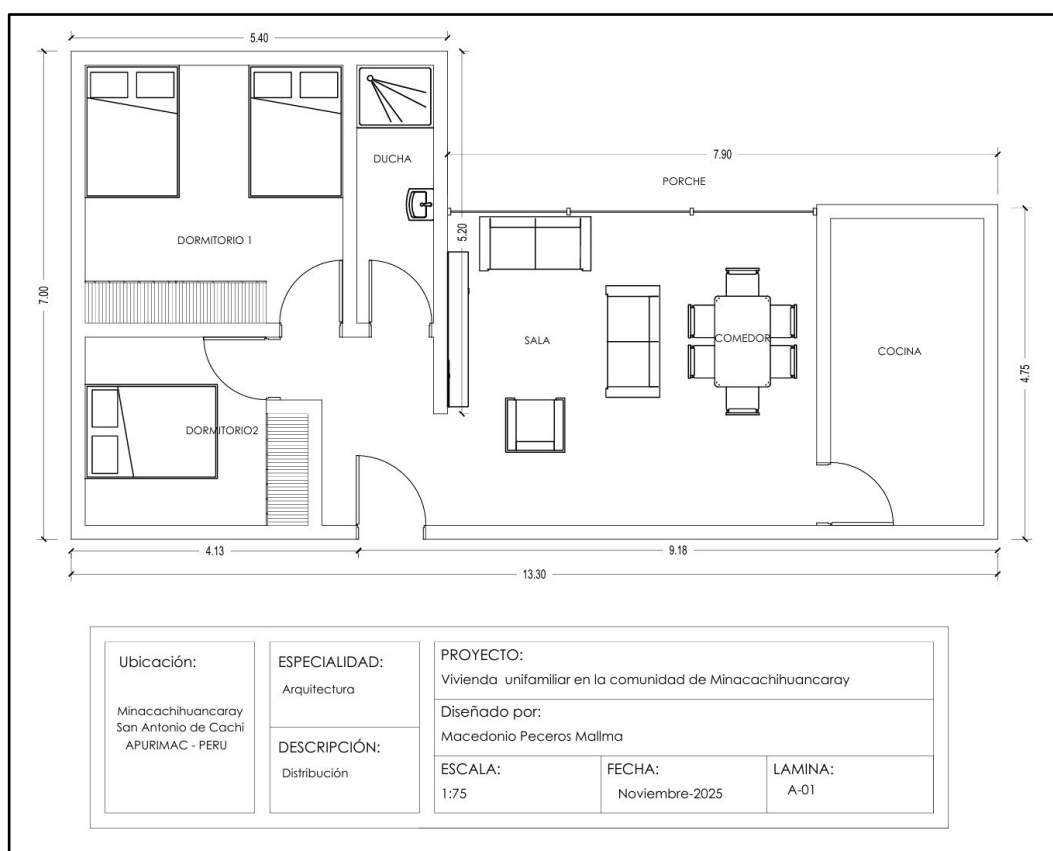


Figura 15 Arquitectura de vivienda unifamiliar. Elaboración propia.

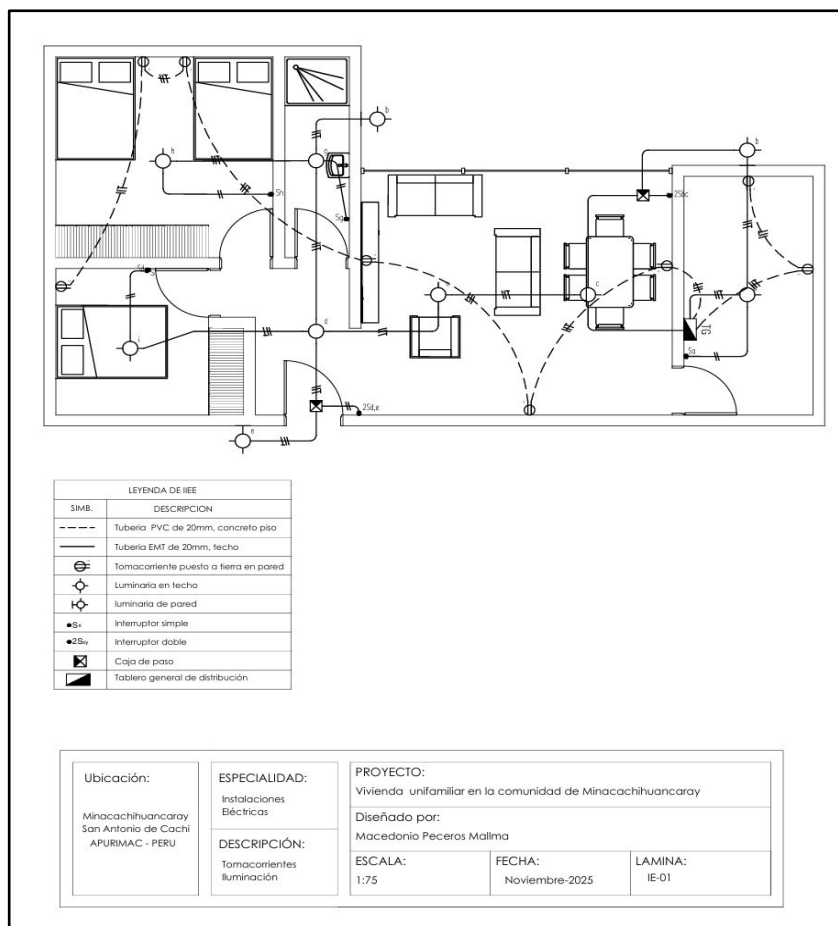


Figura 16 Instalaciones eléctricas de vivienda unifamiliar. Elaboración propia.

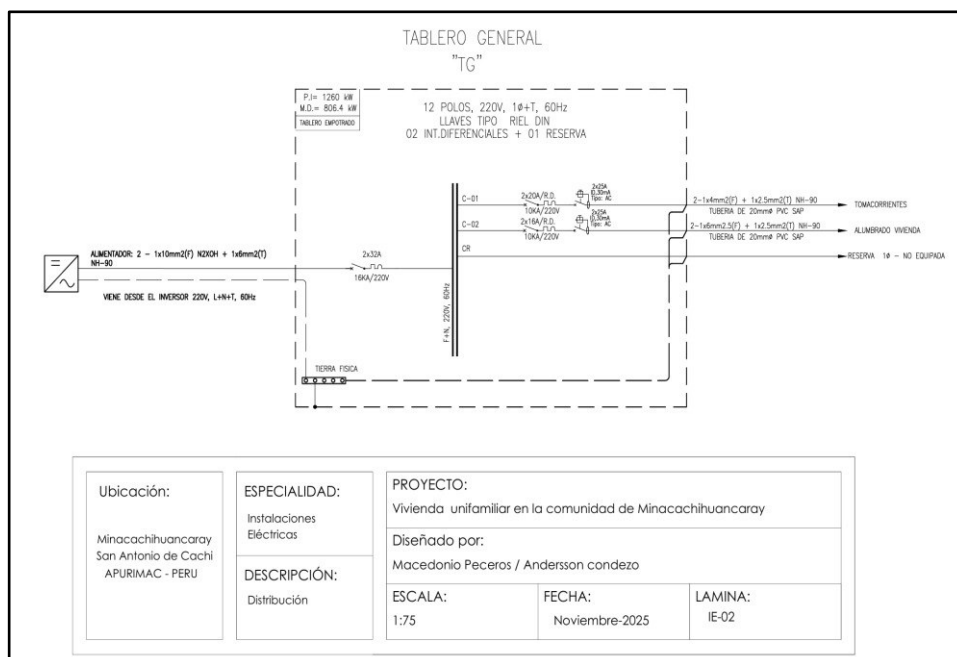


Figura 17 Diagrama unifilar de TG. Elaboración propia.

Selección de calibre de cables y ITM															Fecha: 01.08.2025					
Proyecto: Vivienda Unifamiliar															Revis: M.P.M					
Propietario: Gloria Mallma															Archivo					
															Página 1					
DESCRIPCION	Cantidad	Potencia Unitaria (W)	Potencia Instalada (W)	Factor Demanda (%)	Demanda Máxima (W)	Fases (N°)	V (voltios)	Sistema (1Ø)	Factor fases (N°)	Potencia (%)	In (A)	Id (A)	Fase R (A)	Fase S (A)	FCT (Cu)	Long (m)	S (mm2)	T (mm2)	Caida de Tensión (<2.5%)	
T-G Tablero General, 220 V, F+N+T 60Hz																				
C-1 Tomacorriente	1 Un	640 W	640	100	640	2	220	1Ø	1.00	85	3.42	4.28	3.42	3.42	0.0175	25	4.0	2.5	0.3403	
C-2 Alumbrado	1 Un	620 W	620	100	620	2	220	1Ø	1.00	85	3.32	4.14	3.32	3.32	0.0175	25	2.5	2.5	0.5275	
C-3 Reserva	1 Un	250 W	250	80	200	2	220	1Ø	1.00	85	1.07	1.34	1.07	1.07	0.0175	25	2.5	2.5	0.1702	
TOTAL					1,460	2	220	1Ø	1.00	85	7.81	9.76	7.81	7.81	0.0175	40	10.0	6.0	0.4968	
fs =		0.90				1,314	2	220	1Ø	1.00	85	7.03	8.78	7.03	7.03	0.0175	40	10.0	6.0	0.4472

Figura 18 Dimensionamiento para selección de conductores. Elaboración propia.

IV.9 Software para el monitoreo y gestión inteligente

Como parte de la implementación del sistema fotovoltaico off-grid se consideró la necesidad de desarrollar un sistema de software para el monitoreo de parámetros. Como la instalación fotovoltaica se localiza en una comunidad sin acceso a internet, se ha implementado un sistema de monitoreo local utilizando una microcomputadora Raspberry Pi. Este sistema permite la recolección de datos del inversor mediante comunicación serial RS232, guardando las variables eléctricas en una base de datos local y mostrándolas a través de un panel de control que se puede acceder mediante una red WiFi local. De este modo, se asegura el monitoreo de parámetros como tensión, corriente, frecuencia potencia generada, voltaje de baterías y energía producida sin depender de la conectividad externa como se muestra en la Figura 19.

IV.9.1 Arquitectura del sistema de monitoreo

El sistema estará compuesto por cuatro niveles principales:

1. Sistema de generación eléctrica
2. Sistema de adquisición de datos
3. Sistema de procesamiento y almacenamiento
4. Sistema de visualización

Estructura general

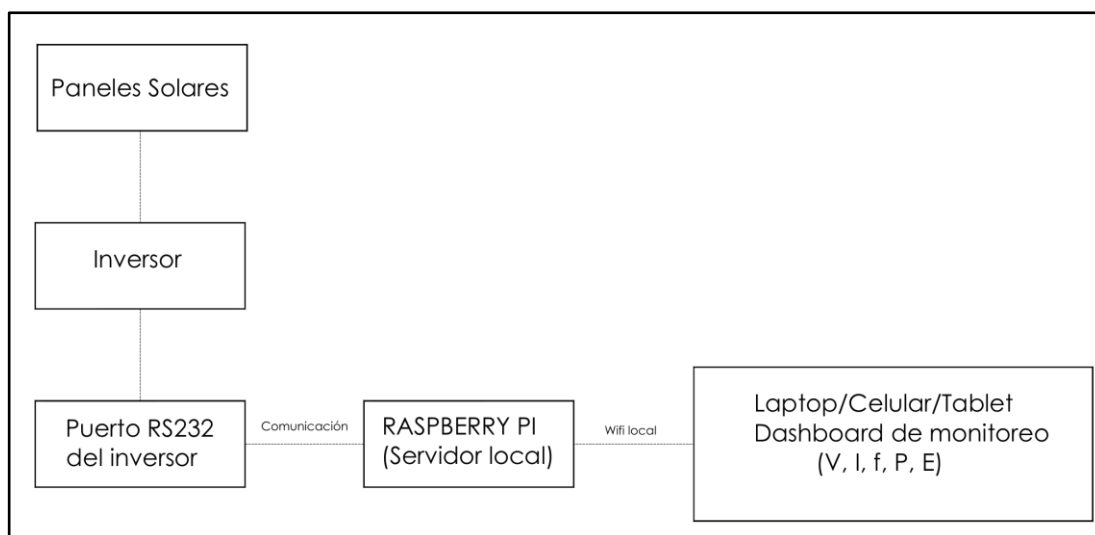


Figura 19 Diagrama de la arquitectura del sistema de monitoreo.
Elaboración propia.

IV.9.2 Adquisición de datos

El inversor Tensite 5.5 kW cuenta con un puerto de comunicación RS232, el cual permite obtener información de operación del sistema fotovoltaico.

Los datos serán transmitidos desde el inversor hacia una microcomputadora mediante un cable de comunicación serial. Para realizar esta conexión se utilizará un Cable RS232 y Adaptador USB a RS232

Este adaptador permitirá que la microcomputadora pueda interpretar los datos provenientes del inversor.

Mediante esta conexión será posible acceder a parámetros operativos tales como:

- Voltaje de salida del inversor
- Corriente de carga
- Frecuencia del sistema
- Potencia generada
- Estado de operación del inversor
- Voltaje del banco de baterías

IV.9.3 Sistema de procesamiento de datos

Para el procesamiento de la información se utilizará una microcomputadora Raspberry pi 4 Model B, el cual actuará como servidor local del sistema. Ver especificaciones técnicas en la Tabla 11.

Tabla 11 Características Raspberry Pi 4 Model B

Categoría	Elemento	Descripción
Características recomendadas	Modelo	Raspberry Pi 4 Model B
	Procesador	Quad Core 1.5 GHz
	Memoria RAM	4 GB
	Conectividad	WiFi integrada
	Puertos	Puertos USB
	Sistema Operativo	Linux
Componentes necesarios	Microcomputadora	Raspberry Pi 4 (4 GB RAM)
	Almacenamiento	Tarjeta microSD de 32 GB
	Alimentación	Fuente de alimentación 5 V – 3 A
	Comunicación	Adaptador USB a RS232

Fuente. Adaptado de Raspberry Pi (2020).

<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>

IV.9.4 Sistema de almacenamiento de datos

La Raspberry Pi almacenará los datos adquiridos del inversor en una base de datos local, lo que permitirá generar historiales de operación del sistema. Para ello se utilizarán las siguientes herramientas de software:

- InfluxDB: para almacenamiento de datos
- Node-RED: para adquisición y procesamiento de datos
- El sistema registrará información como:
 - Voltaje del sistema
 - Corriente
 - Frecuencia
 - Potencia generada
 - Energía producida diaria

Estos datos podrán ser consultados posteriormente para análisis de rendimiento del sistema fotovoltaico.

IV.9.5 Sistema de visualización de datos

Para visualizar la información del sistema se implementará un panel de monitoreo gráfico (dashboard). Este panel será desarrollado utilizando la plataforma, **Grafana** la cual permitirá generar gráficos en tiempo real de las variables eléctricas del sistema.

IV.9.6 Conexión con la tablet de monitoreo

Debido a que la comunidad no dispone de conexión a internet, la Raspberry Pi funcionará como un punto de acceso WiFi local, Esto permitirá que los dispositivos cercanos puedan conectarse directamente al sistema de monitoreo.

El proceso de conexión será el siguiente:

1. La Raspberry Pi crea una red WiFi local.
2. La tablet se conecta a esta red.
3. Desde el navegador web de la tablet se accede al sistema de monitoreo.

IV.10 Análisis económico

En el diagnóstico inicial del estudio se identificó que las viviendas de la zona se encuentran ampliamente separadas entre sí, lo que dificulta la llegada de la red eléctrica convencional debido a los altos costos que implica extender la infraestructura en territorios dispersos. Ante esta limitación, se plantea la instalación de un sistema fotovoltaico off-grid como una solución práctica y económicamente adecuada para asegurar el acceso a la energía en estas áreas rurales. En consecuencia, esta sección desarrolla el análisis económico que compara la alternativa solar con la imposibilidad material y financiera de conectar a la red pública, evidenciando que el sistema fotovoltaico representa la opción más factible y sostenible para cubrir las necesidades energéticas de las viviendas aisladas.

IV.10.1 Costo de implementación del sistema Fotovoltaico off-grid

La siguiente Tabla 12 presenta la lista de componentes seleccionados para el sistema fotovoltaico, escogidos en función de sus características técnicas, eficiencia y fiabilidad. Cada elemento fue elegido tras un análisis

comparativo que consideró su rendimiento, compatibilidad y calidad, garantizando un funcionamiento óptimo y seguro del sistema.

Tabla 12 Presupuesto del sistema Fotovoltaico Off-Grid

PRESUPUESTO DEL SUMINISTRO PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF GRID						
ITEM	DESCRIPCIÓN	MARCA	UND	CANT.	PU	PARCIAL
1	Panel Solar Bifacial 610W	JA SOLAR	und	6	S/ 335.00	S/ 2010.00
2	Inversor Cargador 5500W 48V	Tensite One	und	1	S/ 1124.96	S/ 1124.96
3	Batería de Litio 48V 15kWh 300Ah FLA48300	Felicity Solar	und	1	S/ 5300.00	S/ 5300.00
4	Cable de datos UTP RJ45 CAT 5E	Panduit	m	3	S/ 13.00	S/ 39.00
5	Cable Unifilar Solar PV 35mm2 RZ1-K 1kV Verde	Indeco	m	2	S/ 23.90	S/ 47.80
6	Cable Unifilar Solar PV 35mm2 RV-K 1kV Negro	Indeco	m	2	S/ 23.90	S/ 47.80
7	Terminal de Compresión Cable 35mm - Perno 8mm		und	2	S/ 2.00	S/ 4.00
8	Terminal de Compresión Cable 35mm - Perno 10mm		und	4	S/ 2.00	S/ 8.00
9	Cable Unifilar Solar PV 6mm2 H1Z2Z2-K 1,5kV Rojo	Indeco	m	20	S/ 3.73	S/ 74.60
10	Cable Unifilar Solar PV 6mm2 H1Z2Z2-K 1,5kV Negro	Indeco	m	20	S/ 3.73	S/ 74.60
11	Conector MC4 Multicontact Macho-Hembra		und	1	S/ 9.07	S/ 9.07
12	Caja de Protección IP65 XL (80x60x30)		und	1	S/ 220.00	S/ 220.00
13	Rejilla Plástica con Filtro 148x148mm DC Energy		und	4	S/ 22.20	S/ 88.80
14	Interruptor Termomagnético 50 A 500Vdc 2P DC Solar Energy		und	1	S/ 59.54	S/ 59.54
15	Termomagnético 2P 32A 6KA Monofásico CHINT		und	1	S/ 45.36	S/ 45.36
16	Desconectador de baterías 275A		und	1	S/ 78.09	S/ 78.09

17	Estructura 6 Paneles 144c 15° Inclinada Falcat	und	1	S/ 500.25	S/ 500.25
18	kit para Raspberry Pi 4 Modelo B 4GB	und	1	S/ 412.67	S/ 412.67
					S/
SUBTOTAL					10144.54
IGV					S/ 1826.02
					S/
TOTAL					11970.56

Fuente. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de AutoSolar (2025).

IV.10.2 *Análisis de costos mantenimiento*

Para analizar el costo de operación y mantenimiento de un sistema fotovoltaico es necesario considerar la vida útil de cada tecnología del sistema, así como los costos asociados a su mantenimiento y eventual reemplazo a lo largo de los años. En el caso de los paneles solares, datos técnicos del fabricante indican una vida útil de aproximadamente 30 años bajo condiciones de operación adecuadas. Este periodo se alinea con las garantías comerciales extendidas que suelen ofrecerse en paneles de calidad, los cuales garantizan una degradación mínima de rendimiento durante ese lapso. Los bancos de baterías de litio normalmente presentan una vida de servicio menor, estimada en 10 a 15 años según tecnología y ciclos de carga, mientras que los inversores típicamente tienen una vida útil de 10 a 12 años antes de requerir reemplazo o mantenimiento mayor, siempre que se realice un mantenimiento adecuado y se opere dentro de condiciones óptimas de temperatura y carga.

Los sistemas fotovoltaicos requieren tradicionalmente costos de operación y mantenimiento bajos, debido a que no poseen partes móviles y el proceso de generación de energía no involucra combustibles ni desgaste mecánico constante. En Perú, los costos de O&M se concentran principalmente en actividades como la limpieza periódica de los módulos solares, la inspección de conexiones eléctricas y cableado, y la monitorización del rendimiento del sistema, tareas que pueden realizarse entre uno y cuatro eventos al año. Esta limpieza y revisión contribuye a mantener el rendimiento óptimo del sistema, especialmente en zonas donde hay polvo ambiental, residuos orgánicos o excrementos de aves que puedan reducir la generación

de energía. En estudios técnicos realizados localmente, el costo anual de estas actividades preventivas se estima en valores equivalentes al 1 – 2 % del costo total de la inversión inicial por año, incluyendo revisiones semestrales o anuales a cargo de personal calificado. En la siguiente fórmula haremos el cálculo del costo de mantenimiento anual:

- $O\&M = 1.5\% \times \text{inversión inicial}$
- $O\&M = 1.5 \% \times S/ 11970.56 \approx S/ 180$

Adicionalmente, aunque no sea un costo recurrente, deben considerarse los reemplazos de componentes que no alcanzan la vida útil del resto del sistema. Por ejemplo, los inversores, que transforman corriente continua a corriente alterna para uso doméstico o comercial, generalmente requieren sustitución alrededor de los 10–12 años de operación, y su costo de reemplazo puede representar una fracción significativa del costo original de inversión, ubicándose típicamente en el rango de unos cientos a miles de dólares, dependiendo de la potencia del equipo. Las baterías de litio, usadas para almacenamiento en sistemas off-grid, tienen costos más elevados al momento de sustituirse debido a su tecnología avanzada, pero su duración de más de una década representa una ventaja frente a tecnologías más antiguas como plomo-ácido.

IV.10.3 Cálculo de ahorro y rentabilidad

Para el análisis económico del sistema fotovoltaico off-grid se adoptaron una serie de supuestos técnicos y económicos, alineados con la literatura especializada y el contexto de electrificación rural en el Perú, con el fin de evaluar la viabilidad financiera del proyecto.

Como se muestra anteriormente en la Tabla 12, la inversión inicial o costo de capital (CAPEX) del sistema asciende a S/ 11970.56, monto que incluye el Impuesto General a las Ventas (IGV) y contempla los costos de suministro de equipos, estructura, protecciones e instalación.

La generación anual del sistema fotovoltaico se estimó en 8,032 kWh/año, valor obtenido a partir del recurso solar disponible en la zona y de la configuración del sistema. El consumo real del usuario se estableció en

2,948 kWh/año, de acuerdo con el perfil de carga anual evaluado cómo se estableció en la Tabla 10.

Dado que el sistema es de tipo off-grid y no cuenta con inyección de excedentes a la red eléctrica, para el análisis económico se consideró únicamente la energía efectivamente aprovechada por el usuario, equivalente a su consumo real anual. La energía excedente generada no fue valorizada económicamente.

En la Tabla 13 se muestra el tarifario para el departamento de Apurímac, específicamente para la provincia de Andahuaylas, mediante el cual, nos apoyaremos de aquella información para hallar un costo promedio mensual a partir del consumo real del usuario establecido de 2,948 kWh/año o ≈ 247 kWh/mensual.

Tabla 13 Tarifario eléctrico en Andahuaylas-Apurímac

Consumo (kWh)	Precio unitario (S/. /KWh)
Primero 30kWh	0.2990
Después de los 30kWh	0.7474

Fuente. Elaboración propia adaptado de Electro Sur Este (2025).

A partir de la tabla anterior haremos los siguientes cálculos para hallar un costo estandarizado en base al consumo real mensual:

- $\text{Costo mensual} = 0.2990 \times 30 + 0.7474 \times 217 \approx S/ 171.15$
- $\text{Costo promedio mensual} = \frac{171.15}{247} \approx 0.7$

Para la valorización del ahorro económico, se adoptó un costo de energía convencional evitada de S/ 0.7 por kWh, valor conservador que representa una tarifa promedio residencial y resulta inferior al costo real de generación mediante grupos electrógenos diésel, comúnmente utilizados en zonas rurales, cuyo costo suele superar los S/ 1.00 por kWh.

Adicionalmente, el costo anual de operación y mantenimiento (O&M) del sistema se estimó como el 1.5 % de la inversión inicial, valor estándar para sistemas fotovoltaicos residenciales. De este modo, el costo anual de O&M considerado asciende a S/ 180 por año, e incluye actividades de limpieza de

módulos, inspecciones eléctricas y mantenimiento preventivo, ya calculado con anterioridad.

El ahorro bruto anual se calculó multiplicando el consumo anual del usuario por el costo unitario de la energía convencional, según la siguiente expresión:

- $Ahorro\ bruto = Consumo\ anual \times Costo\ del\ kWh$

$$Ahorro\ bruto = 2948 \times S/0.7 = 2063.6$$

- $Ahorro\ neto\ anual = Ahorro\ B - O\&M$

$$Ahorro\ neto\ anual = 2063.6 - 180 = S/1883.6$$

El ahorro neto anual se obtuvo descontando del ahorro bruto el costo anual de operación y mantenimiento del sistema. El periodo de recuperación de la inversión (payback) se determinará mediante la relación entre la inversión inicial y el ahorro neto anual, mientras que el retorno de la inversión (ROI) anual se calculará como el cociente entre el ahorro neto anual y la inversión inicial, expresado en porcentaje.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

V.1 Resultado del dimensionamiento del sistema Fotovoltaico Off-Grid

El MINEN menciona en el Reglamento Técnico Especificaciones Técnicas y Procedimientos de Evaluación del Sistema Fotovoltaico y sus Componentes para Electrificación Rural, que las características mínimas que debe cumplir un sistema fotovoltaico para el aprovechamiento adecuado del sistema, se mencionan en la Tabla 14.

Tabla 14 Especificaciones técnicas de sistema fotovoltaico

DESCRIPCIÓN	DATOS
Irradiación solar mínima mensual anual	3,5 KWh/m ² -día
Irradiancia solar instantánea máxima anual	1200 W/m ²
Humedad relativa	90%
Rango de temperatura ambiente	-10°C a 45°C

Fuente. Elaboración propia.

Basándonos en las características mínimas para un sistema fotovoltaico en una zona rural, la radiación que se obtiene en la comunidad de Minacachihuancaray es adecuada para poder trabajar y hacer uso de la irradiación para el sistema fotovoltaico (5.15 KWh/m²/día).

A continuación, se muestra un resumen del consumo energético de la vivienda unifamiliar dedicada a la actividad avícola y las características de los componentes principales del sistema fotovoltaico off Grid.

Tabla 15 Consumo energético de vivienda unifamiliar

DESCRIPCIÓN	DATOS
Demanda Energetica Total (Wh/día)	13,466.67

Panel Solar	JA Solar 615W TOPCon N-Type
Inversor	Tensite ONE 5.5KW 48V
Baterías	FLA 48V 300Ah LiFePO ₄
Datos de irradiación (KWh/m ² /día)	5.15
Potencia Total producida por el sistema fotovoltaico (W)	3,376.44

Fuente. Elaboración propia.

En la Tabla 15 se muestra un resumen de la demanda total y las tecnologías a usarse, Para el sistema fotovoltaico propuesto se seleccionó un panel solar monocristalino JA Solar 615 W TOPCon N-Type, debido a que este tipo de tecnología presenta mayor eficiencia, menor coeficiente de temperatura y mejor desempeño en climas secos y de alta radiación, condiciones propias de la comunidad de Minacachihuancaray. Asimismo, se eligió el inversor Tensite ONE de 5.5 kW a 48 V, el cual ofrece una conversión estable y alta compatibilidad con baterías de litio, garantizando un funcionamiento confiable en aplicaciones residenciales aisladas. Para el almacenamiento energético se adoptó una batería FLA 48 V 300 Ah LiFePO₄, ya que la tecnología de litio-hierro-fosfato proporciona mayor densidad energética, ciclos de vida superiores, mayor profundidad de descarga útil (DoD) y mejor estabilidad térmica en comparación con baterías de gel o plomo-ácido tradicionales, optimizando así la autonomía y la vida útil del sistema.

V.2 Marco de ahorro anual

En este apartado se presentan los resultados correspondientes al ahorro anual generado por la implementación del sistema fotovoltaico off-grid. Dichos resultados permiten cuantificar el beneficio económico obtenido a partir de la sustitución del consumo de energía convencional por energía solar, considerando exclusivamente la energía efectivamente utilizada por el usuario. El análisis del ahorro anual constituye un indicador clave para evaluar el impacto económico directo del sistema en el contexto de electrificación rural.

A continuación, se muestran los resultados del cálculo del ahorro bruto anual por energía evitada, el cual representa el valor económico total asociado

al consumo eléctrico que el usuario deja de cubrir mediante fuentes convencionales. Este resultado se obtiene a partir del consumo energético anual del usuario y del costo unitario de la energía eléctrica, sin considerar aún los costos asociados a la operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico.

$$\text{Ahorro} = \text{Consumo anual} \times \text{Costo del kWh}$$

$$\text{Ahorro} = 2948 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \times 0.7 \frac{\text{\$/kWh}}{\text{kWh}} = \text{\$/ 2063.6 por año}$$

Seguidamente, se presentan los resultados del ahorro neto anual, obtenido al descontar los costos de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico del ahorro bruto anual. Este indicador refleja el beneficio económico real generado por el sistema durante su operación anual y permite una evaluación más precisa de su desempeño financiero en condiciones reales de funcionamiento.

$$\text{Ahorro neto} = 2063.6 - 180 = \text{\$/1883.6 por año}$$

V.3 Periodo de recuperación de la inversión (Payback)

En este subapartado se presentan los resultados del periodo de recuperación de la inversión del sistema fotovoltaico off-grid. El payback obtenido permite identificar el tiempo requerido para que los ahorros netos generados por el sistema compensen la inversión inicial realizada, constituyendo un indicador relevante para la evaluación económica del proyecto en el horizonte temporal considerado.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ahorro neto anual}}$$

$$\text{Payback} = \frac{11,970.56}{1,883.6} \approx \mathbf{6.4 \text{ años}}$$

V.4 Retorno de la inversión (ROI)

A continuación, se exponen los resultados correspondientes al retorno de la inversión (ROI) anual del sistema fotovoltaico. Este indicador expresa el beneficio económico obtenido en relación con la inversión inicial, permitiendo evaluar el nivel de rentabilidad del proyecto desde una perspectiva porcentual y comparativa dentro del ámbito de soluciones energéticas para zonas rurales.

$$ROI = \frac{\text{Ahorro neto anual}}{\text{Inversión inicial}} \times 100$$

$$ROI = \frac{1,883.6}{11,970.56} \times 100 \approx \mathbf{15.7\% \textit{ anual}}$$

CAPÍTULO VI: DISCUSIONES

VI.1 Discusión del sobredimensionamiento y su impacto económico

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema fotovoltaico off-grid presenta un sobredimensionamiento significativo en términos de generación energética, ya que produce aproximadamente 8,032 kWh/año, mientras que el consumo real del usuario alcanza solo 2,948 kWh/año, lo que implica que cerca del 63 % de la energía generada no es aprovechada. Desde una perspectiva estrictamente económica, este nivel de energía no utilizada podría interpretarse como una ineficiencia en el dimensionamiento del sistema, debido a la limitada capacidad de almacenamiento y a un perfil de demanda reducido.

Sin embargo, en el contexto de sistemas off-grid ubicados en zonas rurales aisladas, el sobredimensionamiento responde principalmente a criterios de seguridad energética y continuidad del suministro, más que a una optimización del aprovechamiento energético. La elevada fracción solar cercana a 1 durante todo el año y la mínima energía no suministrada (1.5 kWh/año) confirman que el sistema garantiza una autonomía energética prácticamente total. En este sentido, el sobredimensionamiento constituye una decisión técnica justificada, ya que prioriza la confiabilidad del suministro frente a eventuales déficits energéticos, los cuales pueden tener impactos sociales y productivos significativos en zonas rurales.

VI.2 Discusión de la vinculación con el potencial solar regional

La radiación solar promedio de 5.15 kWh/m²·día registrado en la comunidad de Minacachihuancaray se encuentra dentro del rango alto del potencial solar peruano, lo cual explica la elevada producción anual obtenida por el sistema fotovoltaico. Este resultado confirma que la región presenta

condiciones óptimas para la implementación de sistemas solares, permitiendo cubrir completamente la demanda energética del usuario con un número relativamente reducido de paneles (ver Tabla 16).

Asimismo, el alto recurso solar regional contribuye directamente a la competitividad económica del sistema, ya que incrementa la generación anual y reduce el periodo de recuperación de la inversión, incluso considerando pérdidas y sobredimensionamiento. En consecuencia, los resultados obtenidos respaldan la idoneidad del uso de energía fotovoltaica como solución sostenible para la electrificación rural en zonas con características solares similares.

Tabla 16 Comparación entre generación, consumo y energía no aprovechada

Parámetro	Valor	Interpretación
Generación anual	8,032 kWh	Alta producción por recurso solar
Consumo anual	2,948 kWh	Demanda real del usuario
Energía no utilizada	63 %	Asociada a sobredimensionamiento
Energía no suministrada	1.5 kWh/año	Autonomía casi total

Fuente. Elaboración propia.

VI.3 Discusión de la viabilidad económica del sistema

El análisis integral de los resultados económicos demuestra que el sistema fotovoltaico off-grid propuesto es económicamente viable. El periodo de recuperación de la inversión inferior a 10 años, junto con la generación de ahorros netos constantes durante más de dos décadas posteriores al payback, evidencia que la inversión inicial se justifica ampliamente en el horizonte de vida útil del sistema.

Adicionalmente, la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y de tarifas eléctricas variables refuerza la sostenibilidad económica del proyecto, especialmente en zonas rurales donde los costos de la energía convencional suelen ser elevados e inestables. Aunque el sistema no maximiza el aprovechamiento energético desde un punto de vista

estrictamente económico, los beneficios asociados a la seguridad energética y confiabilidad del suministro compensan esta limitación, alineándose con los objetivos de electrificación rural y desarrollo sostenible.

VI.3.1 Marco de ahorro anual

El ahorro neto anual de aproximadamente S/ 1,880 refleja el impacto económico directo del sistema fotovoltaico sobre el gasto energético del usuario. Este resultado pone en evidencia que, aun cuando una parte significativa de la energía generada no es aprovechada, la sustitución de energía convencional por energía solar permite generar beneficios económicos constantes a lo largo del tiempo.

En sistemas off-grid, el ahorro anual no solo debe interpretarse como una reducción monetaria, sino también como una disminución de la vulnerabilidad energética del usuario frente a interrupciones del suministro o incrementos en los costos de combustibles fósiles, aspectos que no siempre son cuantificables económicamente, pero que incrementan el valor social del proyecto.

VI.3.2 Periodo de recuperación de la inversión (Payback)

El periodo de recuperación estimado en aproximadamente 6.4 años se considera competitivo para proyectos de generación energética en zonas rurales. Este valor resulta particularmente relevante si se compara con la vida útil de los principales componentes del sistema, que supera los 20 y 30 años, lo que garantiza un periodo prolongado de beneficios económicos posteriores a la recuperación de la inversión.

Además, el payback obtenido es consistente con estudios similares de electrificación rural mediante sistemas fotovoltaicos, lo que refuerza la confiabilidad de los resultados y demuestra que la inversión es razonable desde una perspectiva de largo plazo.

VI.3.3 Retorno de la inversión (ROI)

El retorno de la inversión anual de 15.7 % evidencia que el sistema fotovoltaico off-grid presenta una rentabilidad atractiva frente a otras alternativas de inversión en infraestructura energética. Este valor supera los umbrales comúnmente aceptados para proyectos de este tipo y refuerza la

conveniencia económica del sistema, especialmente considerando los bajos riesgos operativos asociados a la tecnología fotovoltaica.

Desde una perspectiva de desarrollo rural, un ROI elevado no solo indica rentabilidad financiera, sino también eficiencia en el uso de recursos públicos o privados destinados a mejorar el acceso a la energía en zonas aisladas como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17 Indicadores económicos del sistema fotovoltaico off-grid

Indicador	Resultado	Evaluación
Inversión inicial	S/ 11,976.56	Moderada
Ahorro neto anual	S/ 1883.6	Constante
Payback	6.4 años	Favorable
ROI anual	15.7 %	Económicamente atractivo

Fuente. Elaboración propia.

VI.4 Sostenibilidad del sistema fotovoltaico

En este subcapítulo se presentan los resultados relacionados con la sostenibilidad del proyecto de generación fotovoltaica, entendida como la capacidad del sistema para mantenerse operativamente en el tiempo, satisfacer la demanda energética del usuario y reducir impactos ambientales, sin comprometer recursos futuros. La sostenibilidad se evalúa a partir de la integración de los resultados técnicos, económicos, ambientales y sociales obtenidos en el desarrollo de la investigación.

Desde el punto de vista técnico, los resultados muestran que el sistema fotovoltaico off-grid presenta una fracción solar cercana a 1 durante todo el año y una energía no suministrada mínima, lo que evidencia una alta confiabilidad y continuidad del suministro. La vida útil proyectada de los principales componentes (paneles solares, batería de litio e inversor) permite garantizar el funcionamiento del sistema por un periodo prolongado, asegurando su sostenibilidad operativa en el largo plazo bajo condiciones adecuadas de mantenimiento.

En el ámbito económico, si bien el análisis detallado de viabilidad ya fue desarrollado previamente, los resultados evidencian que la recuperación de la inversión en un periodo menor a 10 años y la generación de ahorros netos constantes durante más de dos décadas contribuyen a la sostenibilidad financiera del proyecto. Esto permite que el sistema no solo sea viable al inicio, sino que mantenga beneficios económicos sostenidos a lo largo de su vida útil.

Respecto a la sostenibilidad ambiental, los resultados confirman que la sustitución de energía convencional por energía solar reduce la dependencia de combustibles fósiles y evita emisiones asociadas a la generación eléctrica tradicional. La elevada producción energética obtenida a partir del recurso solar local refuerza el uso eficiente de una fuente renovable y abundante en la zona de estudio, contribuyendo a la mitigación de impactos ambientales negativos.

Finalmente, en términos sociales, el sistema garantiza autonomía energética y estabilidad en el suministro eléctrico para el usuario, lo que resulta especialmente relevante en zonas rurales aisladas. El acceso continuo a energía eléctrica favorece el desarrollo de actividades productivas, educativas y domésticas, fortaleciendo la sostenibilidad social del proyecto y su contribución al bienestar de la comunidad.

VI.5 Impacto económico, ambiental y social del sistema fotovoltaico

En este subcapítulo se presentan los resultados asociados a los impactos económicos, ambientales y sociales derivados de la implementación del sistema de generación fotovoltaica en la zona de estudio, considerando los beneficios directos e indirectos observados a partir de su operación.

Desde el punto de vista económico, los resultados muestran que el sistema permite una reducción significativa del gasto energético del usuario mediante la generación de ahorros netos anuales constantes. La disminución de la dependencia de fuentes de energía convencionales y de tarifas eléctricas variables contribuye a una mayor estabilidad económica en el largo plazo, especialmente en un contexto rural donde los costos energéticos suelen ser elevados e impredecibles.

En cuanto al impacto ambiental, como se muestra en la Tabla 18, la implementación del sistema fotovoltaico reduce las emisiones contaminantes asociadas a la generación eléctrica convencional, particularmente aquellas vinculadas al uso de combustibles fósiles. La utilización de energía solar como fuente primaria de generación promueve un modelo energético más limpio y sostenible, alineado con los objetivos de transición energética y reducción de la huella ambiental en el sector rural.

Tabla 18 Impacto ambiental del sistema fotovoltaico

Aspecto ambiental	Resultado observado	Impacto ambiental
Fuente de energía	Solar renovable	Uso de recurso limpio e inagotable
Consumo de combustibles fósiles	Eliminado	Reducción de emisiones contaminantes
Emisiones de CO ₂ durante operación	Nulas	Contribución a la mitigación del cambio climático
Ruido durante operación	Nulo	No genera contaminación sonora
Impacto en el entorno local	Bajo	Instalación sin alteraciones significativas
Aprovechamiento del recurso solar local	Alto	Uso eficiente del potencial regional
Generación de residuos	Baja	Residuos limitados al fin de vida útil

Fuente. Elaboración propia.

Respecto al impacto social, los resultados evidencian que el acceso a un suministro eléctrico confiable y continuo mejora las condiciones de vida del usuario, al permitir el uso permanente de equipos eléctricos, iluminación adecuada y servicios básicos. Asimismo, la autonomía energética obtenida reduce la vulnerabilidad frente a interrupciones del suministro, fortaleciendo la resiliencia energética de la comunidad y contribuyendo al desarrollo social local. En la Tabla 19 se visualiza cada el resultado y su respectivo beneficio de optar una sistema fotovoltaico.

Tabla 19 Impacto social del sistema fotovoltaico

Aspecto social	Resultado obtenido	Beneficio social
Acceso continuo a energía eléctrica	Garantizado	Mejora de la calidad de vida
Autonomía energética	Alta	Reducción de la vulnerabilidad energética
Continuidad del servicio	Fracción solar ≈ 1	Suministro confiable todo el año
Energía no suministrada	0	Mínimas interrupciones
Dependencia de proveedores externos	Baja	Mayor independencia del usuario
Soporte a actividades productivas	Positivo	Facilita desarrollo económico local
Adecuación a zonas rurales	Alta	Tecnología compatible con entornos aislados

Fuente. Elaboración propia.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la implementación del sistema fotovoltaico no solo genera beneficios económicos directos, sino que también produce impactos ambientales positivos y efectos sociales favorables, consolidando su aporte al desarrollo sostenible de la zona de estudio.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de cargas realizado, se determinó que la vivienda en la comunidad de Minacachihuancaray presenta una demanda energética diaria moderada, principalmente concentrada en iluminación, equipos de uso doméstico básico y dispositivos de comunicación. Con un consumo anual estimado de 2,948 kWh, el cálculo permitió el diseño de un sistema fotovoltaico off-grid que cubre eficientemente las necesidades energéticas de la vivienda, sin comprometer la continuidad del suministro eléctrico.

A partir de la demanda energética identificada y del alto potencial solar de la zona, se definieron las características técnicas del sistema fotovoltaico off-grid, compuesto por paneles solares bifaciales, inversor cargador y almacenamiento en baterías de litio. El diseño garantiza una fracción solar cercana a la unidad durante todo el año, una autonomía energética casi total y una mínima energía no suministrada. Aunque el sistema tiene un sobredimensionamiento en la capacidad de generación, esta decisión responde a criterios de confiabilidad y seguridad energética, esenciales en zonas rurales aisladas sin acceso a la red convencional.

El análisis técnico-económico realizado demuestra que el sistema fotovoltaico off-grid es económicamente viable y sostenible en el largo plazo. Con una inversión inicial de S/ 11,970.56, el proyecto alcanza un periodo de recuperación aproximado de siete años, un retorno de inversión anual cercano al 15.7 % y genera ahorros netos constantes durante más de dos décadas posteriores al payback. Estos resultados evidencian que, pese al sobredimensionamiento energético, el proyecto mantiene una relación favorable entre costos y beneficios, validando su sostenibilidad económica.

frente a las alternativas convencionales de suministro eléctrico en zonas rurales.

El diseño de un sistema fotovoltaico off-grid genera impactos ambientales y sociales positivos para la comunidad de Minacachihuancaray. Desde el punto de vista ambiental, el uso de energía solar reduce la dependencia de combustibles fósiles, disminuye las emisiones de gases contaminantes y promueve el aprovechamiento de un recurso renovable abundante en la región. Socialmente, el acceso continuo a energía eléctrica mejora la calidad de vida de la población, fortalece las actividades educativas y productivas, incrementa la seguridad mediante una mejor iluminación y contribuye al desarrollo sostenible de la comunidad. Estos beneficios refuerzan el rol de la generación fotovoltaica como una solución integral para la electrificación rural.

CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar, en futuros diseños, estrategias para optimizar el uso de la energía generada, considerando que el sistema presenta un nivel de sobredimensionamiento. La incorporación de cargas productivas adicionales o la ampliación del almacenamiento permitiría incrementar el aprovechamiento energético sin comprometer la confiabilidad del diseño. Esta optimización contribuiría a mejorar el retorno económico del sistema.

Se recomienda establecer un plan de mantenimiento preventivo anual que incluya limpieza periódica de los paneles, inspección de conexiones eléctricas y verificación del estado del banco de baterías e inversor. Un mantenimiento adecuado garantizará la vida útil proyectada de los componentes (30 años para paneles, 20 años para baterías y 12 años para el inversor), asegurando la sostenibilidad técnica del sistema.

Se recomienda analizar la posibilidad de replicar el modelo de diseño en otras viviendas de la comunidad de Minacachihuancaray con características de consumo similares. La estandarización del diseño podría reducir costos unitarios de implementación y contribuir al cierre de brechas de electrificación rural en la zona

Se recomienda promover capacitaciones básicas dirigidas a los usuarios sobre operación segura, uso eficiente de la energía y mantenimiento elemental del sistema. Asimismo, se sugiere articular el proyecto con programas regionales o nacionales de electrificación rural para asegurar respaldo técnico y sostenibilidad a largo plazo.

Dado que los costos de equipos y tarifas eléctricas pueden variar en el tiempo, se recomienda actualizar periódicamente el análisis financiero del

sistema, especialmente si se proyectan ampliaciones o mejoras tecnológicas. Esto permitirá mantener la viabilidad económica y optimizar decisiones futuras de inversión.

CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA

Tesis de grado y maestría

- Canchumanya Díaz, D. (2023). *Análisis de generación fotovoltaica para mejorar la calidad de energía eléctrica en el alimentador A4213* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP.
- Domínguez Vargas, M. C. (2024). *Diseño de un sistema de generación fotovoltaico residencial autónomo para consumo nivel 1* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Institucional EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25805>.
- Escobedo León, R. A. (2018). *Implementación de un sistema fotovoltaico para un laboratorio de cómputo en el Colegio Nacional "Coloso y Emblemático Jaén de Bracamoros" – Jaén – Cajamarca* [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio UNPRG.
- Gamarra Tupac Yupanqui, A. A., Godiño Vilchez, F. E., Huaihua Rojas, E. D., Huamán Izquierdo, D. I., & Villavicencio Vilcapoma, J. E. (2021). *Incorporación de paneles fotovoltaicos al circuito de instalaciones eléctricas* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP.
- Mensah, K. (2022). *Assessment of standalone solar PV systems for rural electrification in Ghana* [Tesis de maestría, University of Ghana]. Repositorio UG. <https://ugspace.ug.edu.gh/handle/123456789/39001>.
- Peña, D. W., & Acuña, R. (2022). *Diseño de un sistema fotovoltaico para suministrar energía eléctrica en el caserío Juan Velasco Alvarado, Chirinos – Cajamarca* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio UNJ.
- Shrestha, P. (2023). *Design and analysis of off-grid solar power systems for remote villages in Nepal* [Tesis de maestría, Tribhuvan University]. Repositorio TU. <https://elibrary.tucl.edu.np/handle/123456789/9501>.
- Tumbaco Chumo, K. A., & Pantaleón Iñiguez, K. R. (2023). *Generación de energía eléctrica a través de un sistema fotovoltaico off-grid en la zona rural de Guayaquil* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24665/1/UPS-GT004259.pdf>.

Artículos en revistas científicas

- Mbinkar, E. N., Asoh, D. A., Tchuidjan, R., & Baldeh, A. (2021). *Design of a photovoltaic mini-grid system for rural electrification in Sub-Saharan Africa*. *Energy and Power Engineering*, 13(3), 91-110. <https://www.scirp.org/journal/epe>.
 - Müller, F., Rodríguez, P., & Escobar, R. (2022). *Advances in photovoltaic technologies for rural electrification*. *Energy Science Journal*, 10(3), 45-67.
 - Ortiz, A., Fernández, L., & Morales, D. (2021). *Impacto de la energía solar fotovoltaica en comunidades rurales de América Latina*. *Revista de Energía Renovable*, 8(2), 122-140.
-

Libros

- González, J., & Ramírez, M. (2020). *Sistemas fotovoltaicos: Diseño y aplicación en comunidades rurales*. Editorial Energía Sostenible.
 - Lorenzo, E. (2021). *Energía solar fotovoltaica: Principios, diseño y aplicaciones*. Ediciones Técnicas.
-

Informes y documentos de organismos oficiales

- Agencia Internacional de Energía (IEA). (2023). *Solar Energy Market Report 2023*. Recuperado de <https://www.iea.org/>.
- Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA). (2023). *Solar photovoltaic energy for off-grid applications*. Recuperado de <https://www.irena.org/>.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2021). *Modelos de electrificación rural sostenible en América Latina*.
- Banco Mundial. (2021). *Energía renovable para el desarrollo: Estrategias de mantenimiento en sistemas solares rurales*.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2021). *Electrificación rural con energías renovables: Avances y desafíos en América Latina*. Naciones Unidas.
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2021). *NTP 399.401-2021: Requisitos técnicos para la instalación de sistemas fotovoltaicos autónomos en zonas rurales*.
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2022). *NTP 399.404-2022: Especificaciones técnicas para paneles solares en el Perú*.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2019). *Decreto Supremo N.º 009-2019-EM: Reglamento de Generación Distribuida en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional*.

- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2020). *Decreto Supremo N.º 018-2020-EM: Regulación para la instalación de sistemas fotovoltaicos en zonas rurales*.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2020). *Plan Nacional de Energía Renovable 2020-2030*.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2021). *Programa Masificación de Energía Solar en Zonas Rurales: Informe de avances y proyecciones*.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2022). *Avances en electrificación rural con energía solar en el Perú*. Informe Técnico.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2022). *Estrategias para la sostenibilidad de sistemas fotovoltaicos en zonas rurales*.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2022). *Potencial de energía solar en el Perú y su aplicación en zonas rurales*. Recuperado de <https://www.minem.gob.pe/>.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). (2021). *Impacto del Fondo de Inclusión Social Energético en comunidades rurales*.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). (2022). *Regulación de tarifas para sistemas fotovoltaicos rurales en el Perú*.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2022). *Impacto de la electrificación en la mejora de servicios de salud en comunidades rurales*.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). *Contaminación del aire y sus efectos en la salud pública: Perspectivas para la transición energética*.

CAPÍTULO X: ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

“DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA VIVIENDA EN LA COMUNIDAD MINACACHIHUANCARAY, APURÍMAC”				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	<u>Variable independiente:</u> X = Sistema fotovoltaico off-Gridd.	Diseño: No experimental Enfoque: Cuantitativo Tipo: Aplicada
¿De qué manera podemos utilizar celdas fotovoltaicas para realizar el suministro eléctrico a las viviendas de la Comunidad Mina, Distrito de San Antonio de Cachi, Provincia de Andahuaylas, Apurímac?	Diseñar un sistema de generación off grid utilizando celdas fotovoltaicas para suministrar energía eléctrica a una vivienda de la comunidad de Minacachihuancaray- San Antonio de Cachi- Andahuaylas.	El diseño de un sistema fotovoltaico off-grid, basado en el adecuado dimensionamiento de la demanda energética y condiciones solares, permite plantear una solución técnicamente viable para el suministro de energía eléctrica en una vivienda de la comunidad Minacachihuancaray.		
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas		

“DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA VIVIENDA EN LA COMUNIDAD MINACACHIHUANCARAY, APURÍMAC”				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
¿Cuál es la demanda energética de las viviendas de la comunidad Minacachihuancaray y qué factores se deben considerar en el diseño del sistema fotovoltaico off-grid? ¿Cuáles son las características técnicas del sistema fotovoltaico off-grid a utilizar y cuáles son sus limitaciones de diseño? ¿De qué manera un proyecto de generación solar será sostenible? ¿Cuáles son los posibles impactos ambientales y sociales del diseño de un sistema fotovoltaico off-grid?	Calcular la demanda energética diaria de una vivienda de la comunidad de Minacachihuancaray – San Antonio de Cachi, identificando las necesidades de consumo eléctrico diario. Determinar las características técnicas del sistema de generación fotovoltaica. Realizar un análisis técnico-económico para evaluar la sostenibilidad del diseño del sistema fotovoltaico off-grid, asegurando su viabilidad a largo plazo. Analizar los impactos ambientales y sociales asociados al diseño de un sistema fotovoltaico off-grid, para garantizar su compatibilidad con la comunidad.	El cálculo adecuado de la demanda energética diaria de la vivienda unifamiliar permite el diseño de un sistema fotovoltaico off-grid que cubre el consumo eléctrico requerido. La determinación correcta de la capacidad del sistema fotovoltaico off-grid garantiza un suministro continuo y estable de energía eléctrica en la vivienda unifamiliar. El análisis técnico-económico adecuado de los componentes del sistema fotovoltaico off-grid determina la selección de una alternativa eficiente y de bajo costo de operación y mantenimiento para la vivienda. El diseño de un plan de instalación y mantenimiento del sistema fotovoltaico off-grid, basado en protocolos técnicos y de gestión, asegura la sostenibilidad, eficiencia y prolongación de la vida útil del sistema en la vivienda de la comunidad.	<u>Variable dependiente:</u> Y = Suministro de energía eléctrica.	Nivel: Descriptivo-propositivo Población: Comunidad Minacachihuancaray Muestra: Vivienda unifamiliar