



# **Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica**

## **Sistemas fotovoltaicos autónomos y su relación con el consumo energético y gasto eléctrico residencial en Ate y Santa Anita, Lima**

### **TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista**

### **AUTOR**

**Edson Irwin CUEVA ARCE**

### **ASESOR**

**Dr. Walter Alejandro GUZMÁN ESTREMADOYRO**

**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

---

Cueva, E. (2026). *Sistemas fotovoltaicos autónomos y su relación con el consumo energético y gasto eléctrico residencial en Ate y Santa Anita, Lima*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

### Metadatos complementarios

|                                  |                                                                                           |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Datos de autor</b>            |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Edson Irwin Cueva Arce                                                                    |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 44081929                                                                                  |
| URL de ORCID                     | No Aplica                                                                                 |
| <b>Datos de asesor</b>           |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Dr. Walter Alejandro Guzmán Estremadoyro                                                  |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 21143307                                                                                  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0000-0002-7550-0371">https://orcid.org/0000-0002-7550-0371</a> |
| <b>Datos del jurado</b>          |                                                                                           |
| <b>Presidente del jurado</b>     |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Dr. Luis Mark Rudy Ponce Martínez                                                         |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 08117818                                                                                  |
| <b>Miembro del jurado 1</b>      |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Mg. Edy Alberto Roman Ccorahua                                                            |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 06767696                                                                                  |
| <b>Miembro del jurado 2</b>      |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Mg. Delfin Genaro Susanibar Celedonio                                                     |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 16010188                                                                                  |
| <b>Datos de investigación</b>    |                                                                                           |
| Línea de investigación           | Energías renovables y eficiencia energética en sistemas eléctricos.                       |
| Grupo de investigación           | No Aplica                                                                                 |
| Agencia de financiamiento        | No Aplica                                                                                 |

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ubicación geográfica de la investigación               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• País: Perú</li> <li>• Departamento: Lima</li> <li>• Provincia: Lima</li> <li>• Distrito: Ate</li> <li>• Latitud: -12.0369</li> <li>• Longitud: -76.9250</li> <li>• País: Perú</li> <li>• Departamento: Lima</li> <li>• Provincia: Lima</li> <li>• Distrito: Santa Anita</li> <li>• Latitud: -12.0444</li> <li>• Longitud: -76.9717</li> </ul> |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | 2024 – 2025                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| URL de disciplinas OCDE                                | Ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01</a>                                                                                                                                                                                                                                   |



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



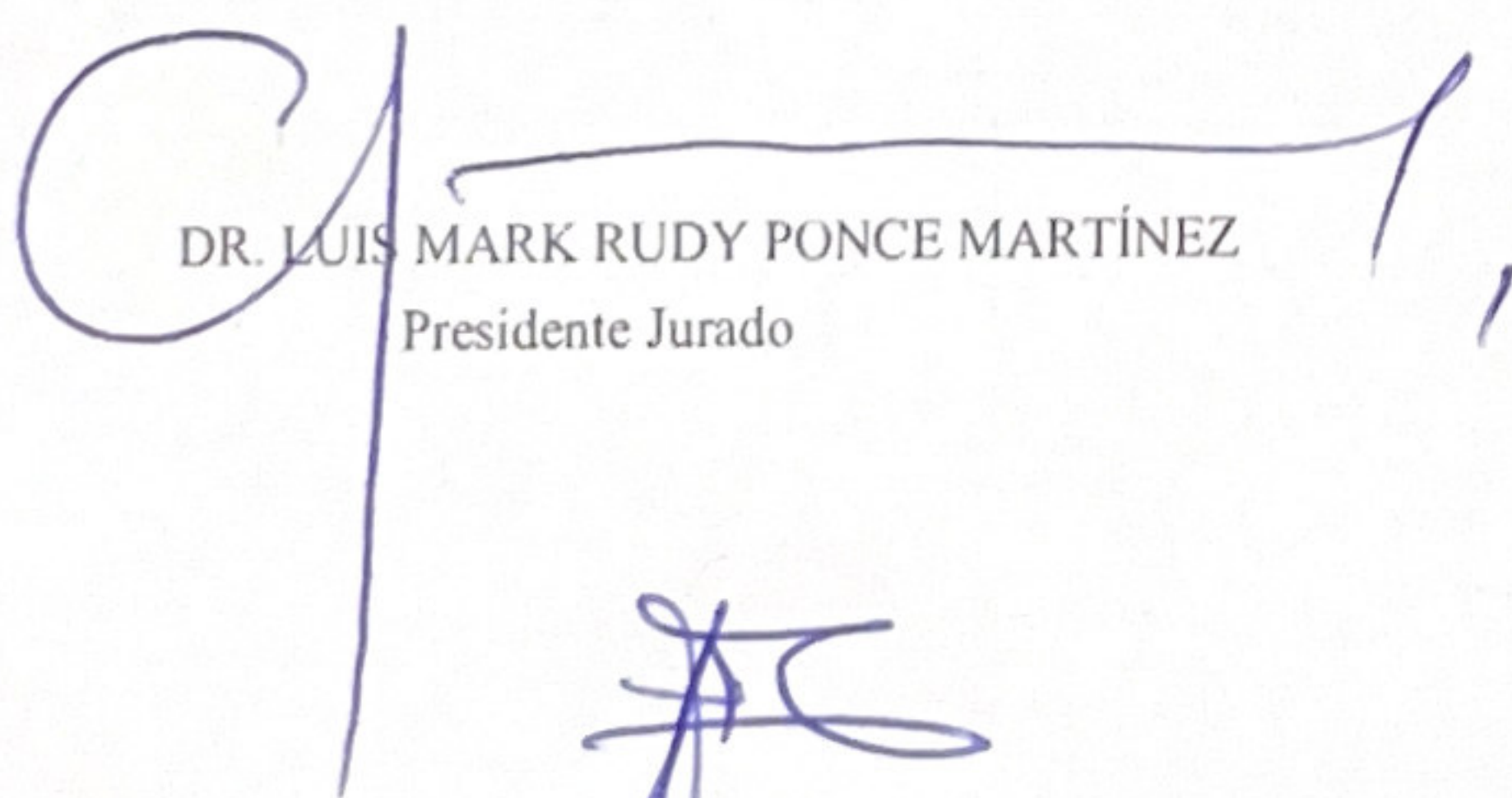
**ACTA DE SUSTENTACIÓN**  
**TESIS**  
**ACTA N°07/FIEE-PPP/2026**

Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 16 de enero del 2026, como presidente de Jurado el **DR. LUIS MARK RUDY PONCE MARTÍNEZ**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. EDY ALBERTO ROMAN CCORAHUA**, el Miembro de Jurado el **MG. DELFIN GENARO SUSANIBAR CELEDONIO** y Miembro Asesor el **DR. WALTER ALEJANDRO GUZMÁN ESTREMADOYRO**.

Después de escuchar la Sustentación Presencial de la Tesis del Bachiller **EDSON IRWIN CUEVA ARCE** con código 6190167 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista sustentó la Tesis titulada **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS Y SU RELACIÓN CON EL CONSUMO ENERGÉTICO Y GASTO ELÉCTRICO RESIDENCIAL EN ATE Y SANTA ANITA, LIMA**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 16 (MESES).

Ciudad Universitaria, 16 de enero del 2026

  
DR. LUIS MARK RUDY PONCE MARTÍNEZ  
Presidente Jurado

  
MG. EDY ALBERTO ROMAN CCORAHUA  
Miembro Jurado

  
MG. DELFIN GENARO SUSANIBAR CELEDONIO  
Miembro Jurado

  
DR. WALTER ALEJANDRO GUZMÁN ESTREMADOYRO  
Miembro Asesor



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

## **CERTIFICADO DE SIMILITUD**

Yo, **WALTER ALEJANDRO GUZMÁN ESTREMADOYRO** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°04/FIEE-PPP/2026 de la Tesis titulada **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS Y SU RELACIÓN CON EL CONSUMO ENERGÉTICO Y GASTO ELÉCTRICO RESIDENCIAL EN ATE Y SANTA ANITA, LIMA**, presentado por el bachiller EDSON IRWIN CUEVA ARCE, 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 7% 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, 16 de Enero del 2026

Firma del Asesor

DNI: **21143307**

Nombres y apellidos del asesor:

**WALTER ALEJANDRO GUZMÁN ESTREMADOYRO**

## **DEDICATORIA**

A mi madre y a mi padre, por su ejemplo de fortaleza, esfuerzo y amor incondicional.

A mi hermana, por su apoyo permanente en cada meta alcanzada.

A mis maestros, por su guía y enseñanza en el camino académico.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por la fortaleza y perseverancia que hicieron posible este logro.

A mi madre, padre y hermana, por su apoyo incondicional y constante inspiración.

A mis profesores y asesores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNMSM, por su guía y compromiso académico.

A mis compañeros y amigos, por su motivación a lo largo de este camino

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                                          |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| CARÁTULA .....                                                                           | i    |
| DEDICATORIA .....                                                                        | ii   |
| AGRADECIMIENTO .....                                                                     | iii  |
| ÍNDICE GENERAL.....                                                                      | iv   |
| LISTA DE TABLAS .....                                                                    | viii |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                   | xi   |
| RESUMEN.....                                                                             | xii  |
| ABSTRACT.....                                                                            | xiv  |
| CAPÍTULO I: .....                                                                        | 1    |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                       | 1    |
| 1.1. Contexto y justificación de la investigación .....                                  | 1    |
| 1.2. Planteamiento del problema .....                                                    | 2    |
| 1.4. Importancia y Alcance de la investigación .....                                     | 3    |
| 1.5. Limitaciones de la investigación .....                                              | 4    |
| CAPÍTULO II: .....                                                                       | 6    |
| REVISIÓN DE LITERATURA.....                                                              | 6    |
| 2.1. Marco teórico – Antecedentes globales de la energía solar .....                     | 6    |
| 2.1.1. Fundamentos físicos de la conversión fotovoltaica, eficiencia y<br>pérdidas ..... | 7    |
| 2.1.2. Radiación solar y potencial energético del Perú .....                             | 8    |
| 2.2. Antecedentes del estudio – Nacionales .....                                         | 9    |
| 2.2.1. Antecedentes del estudio – Internacionales .....                                  | 11   |
| 2.3. Bases teóricas – Componentes de un sistema fotovoltaico autónomo .....              | 12   |
| 2.3.1. Normativa peruana y normas internacionales .....                                  | 14   |
| 2.4. Definición de términos y marco conceptual .....                                     | 15   |
| CAPÍTULO III: .....                                                                      | 18   |
| HIPÓTESIS Y VARIABLES.....                                                               | 18   |

|                            |                                                                         |    |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.                       | Hipótesis general y específicas.....                                    | 18 |
| 3.2.                       | Variables de estudio .....                                              | 19 |
| 3.3.                       | Operacionalización de variables .....                                   | 20 |
| CAPÍTULO IV:.....          |                                                                         | 22 |
| MATERIALES Y MÉTODOS ..... |                                                                         | 22 |
| 4.1.                       | Introducción.....                                                       | 22 |
| 4.2.                       | Caracterización de la demanda energética.....                           | 24 |
| 4.3.                       | Evaluación del recurso solar .....                                      | 25 |
| 4.4.                       | Selección de módulos fotovoltaicos .....                                | 26 |
| 4.5.                       | Selección de inversores y reguladores .....                             | 27 |
| 4.6.                       | Diseño preliminar del sistema fotovoltaico .....                        | 28 |
| 4.7.                       | Simulación del sistema con software libre .....                         | 30 |
| 4.8.                       | Evaluación económica y análisis de viabilidad .....                     | 32 |
| 4.9.                       | Selección de programas de libre acceso para análisis complementarios .. | 33 |
| 4.10.                      | Verificación de cumplimiento normativo y de estándares .....            | 34 |
| 4.11.                      | Plan de implementación y cronograma preliminar .....                    | 35 |
| 4.12.                      | Evaluación de riesgos y medidas de mitigación.....                      | 36 |
| 4.13.                      | Plan de mantenimiento preventivo y correctivo .....                     | 37 |
| 4.14.                      | Estrategias de capacitación y transferencia de conocimiento .....       | 38 |
| 4.15.                      | Síntesis general de materiales y métodos.....                           | 39 |
| CAPÍTULO V: .....          |                                                                         | 40 |
| RESULTADOS .....           |                                                                         | 40 |
| 5.1.                       | Introducción al capítulo .....                                          | 40 |
| 5.2.                       | Caracterización climática y radiación solar en Lima Metropolitana ..... | 41 |
| 5.3.                       | Consumo energético base.....                                            | 42 |
| 5.4.                       | Dimensionamiento preliminar del sistema .....                           | 43 |
| 5.5.                       | Selección de módulos fotovoltaicos .....                                | 44 |
| 5.6.                       | Selección del sistema de almacenamiento en baterías .....               | 45 |
| 5.7.                       | Selección del inversor y sistema de conversión de energía .....         | 46 |
| 5.8.                       | Diseño del sistema de control y protecciones .....                      | 47 |
| 5.9.                       | Integración del sistema y análisis de pérdidas.....                     | 48 |
| 5.10.                      | Simulación del sistema fotovoltaico en software libre .....             | 49 |

|                                     |                                                                              |    |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.11.                               | Resultados comparativos del sistema propuesto vs. consumo convencional ..... | 51 |
| 5.12.                               | Evaluación económica y período de retorno de la inversión .....              | 52 |
| 5.13.                               | Impacto ambiental y contribución a la sostenibilidad .....                   | 53 |
| 5.14.                               | Análisis de confiabilidad y riesgos del sistema.....                         | 54 |
| 5.15.                               | Validación del diseño con estándares nacionales e internacionales .....      | 55 |
| 5.16.                               | Discusión de resultados integrados del sistema .....                         | 56 |
| 5.17.                               | Evaluación de impacto social y percepción de los usuarios .....              | 58 |
| 5.18.                               | Comparación del sistema propuesto con experiencias internacionales..         | 59 |
| 5.19.                               | Escenarios de escalabilidad y replicabilidad del sistema .....               | 61 |
| 5.20.                               | Síntesis final de los resultados del sistema propuesto .....                 | 62 |
| CAPÍTULO VI: .....                  |                                                                              | 64 |
| DISCUSIÓN .....                     |                                                                              | 64 |
| 6.1.                                | Introducción a la discusión .....                                            | 64 |
| 6.2.                                | Discusión técnica del desempeño del sistema .....                            | 64 |
| 6.3.                                | Discusión económica.....                                                     | 65 |
| 6.4.                                | Discusión ambiental.....                                                     | 67 |
| 6.5.                                | Discusión social y percepción de usuarios .....                              | 68 |
| 6.6.                                | Discusión normativa y política energética.....                               | 69 |
| 6.7.                                | Comparación internacional.....                                               | 70 |
| 6.8.                                | Limitaciones del estudio .....                                               | 71 |
| 6.9.                                | Proyecciones y recomendaciones para investigaciones futuras .....            | 72 |
| 6.10.                               | Síntesis de la discusión.....                                                | 73 |
| CAPÍTULO VII: .....                 |                                                                              | 75 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... |                                                                              | 75 |
| 7.1.                                | Introducción.....                                                            | 75 |
| 7.2.                                | Conclusiones generales.....                                                  | 75 |
| 7.3.                                | Conclusiones específicas.....                                                | 77 |
| 7.4.                                | Recomendaciones técnicas .....                                               | 78 |
| 7.5.                                | Recomendaciones académicas y de investigación .....                          | 79 |
| 7.6.                                | Síntesis final .....                                                         | 80 |
| CAPÍTULO VIII: .....                |                                                                              | 82 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| BIBLIOGRAFÍA .....                                                            | 82 |
| CAPÍTULO IX.....                                                              | 86 |
| ANEXOS .....                                                                  | 86 |
| Anexo 1: Datos de radiación solar y climáticos de Lima Metropolitana .....    | 86 |
| Anexo 2: Cálculo del dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo ..... | 87 |
| Anexo 3: Tablas detalladas de consumo energético residencial.....             | 91 |
| Anexo 4: Costos y análisis económico extendido .....                          | 94 |
| Anexo 5: Normativa técnica aplicable .....                                    | 96 |
| Anexo 6: Simulaciones y gráficas de rendimiento .....                         | 98 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Consumo promedio de energía en viviendas de Lima Metropolitana               | 4  |
| Tabla 2. Evolución de la capacidad instalada de energía solar en diferentes regiones  | 7  |
| Tabla 3. Principales fuentes de pérdidas en sistemas fotovoltaicos                    | 8  |
| Tabla 4. Radiación solar promedio mensual en Lima Metropolitana                       | 9  |
| Tabla 5. Antecedentes nacionales de sistemas fotovoltaicos                            | 10 |
| Tabla 6. Antecedentes internacionales de sistemas fotovoltaicos                       | 12 |
| Tabla 7. Componentes principales de un sistema fotovoltaico autónomo                  | 13 |
| Tabla 8. Normativa peruana e internacional aplicable a sistemas fotovoltaicos         | 15 |
| Tabla 9. Relación entre hipótesis y objetivos de la investigación                     | 18 |
| Tabla 10. Definición de variables con dimensiones e indicadores                       | 19 |
| Tabla 11. Matriz de operacionalización de variables                                   | 20 |
| Tabla 12. Insumos y fuentes de referencia para el diseño del sistema fotovoltaico     | 22 |
| Tabla 13. Software de libre acceso utilizado para el análisis                         | 23 |
| Tabla 14. Consumo eléctrico mensual representativo (kWh)                              | 24 |
| Tabla 15. Resumen de parámetros de demanda energética                                 | 25 |
| Tabla 16. Irradiancia solar promedio mensual en Lima Metropolitana                    | 25 |
| Tabla 17. Parámetros representativos del recurso solar en Lima                        | 26 |
| Tabla 18. Especificaciones representativas de módulo fotovoltaico                     | 27 |
| Tabla 19. Especificaciones representativas de inversores                              | 28 |
| Tabla 20. Especificaciones representativas de reguladores de carga                    | 28 |
| Tabla 21. Resumen del dimensionamiento preliminar del sistema                         | 30 |
| Tabla 22. Generación mensual simulada del sistema fotovoltaico                        | 31 |
| Tabla 23. Indicadores de desempeño del sistema simulado                               | 32 |
| Tabla 24. Costos iniciales y de mantenimiento del sistema                             | 32 |
| Tabla 25. Resultados del análisis económico                                           | 33 |
| Tabla 26. Programas de libre acceso seleccionados                                     | 34 |
| Tabla 27. Normas y estándares aplicados al diseño de sistemas fotovoltaicos autónomos | 35 |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 28. Cronograma preliminar de implementación del sistema                                             | 35 |
| Tabla 29. Riesgos identificados y medidas de mitigación                                                   | 36 |
| Tabla 30. Análisis comparativo de casos de estudio                                                        | 37 |
| Tabla 31. Estrategias de capacitación y transferencia de conocimiento                                     | 38 |
| Tabla 32. Resumen general de materiales y métodos                                                         | 39 |
| Tabla 33. Promedios de radiación solar y temperatura en Lima Metropolitana                                | 42 |
| Tabla 34. Consumo eléctrico promedio mensual por categoría de equipos en Lima Metropolitana               | 43 |
| Tabla 35. Parámetros técnicos del dimensionamiento preliminar del sistema                                 | 44 |
| Tabla 36. Características técnicas de los módulos fotovoltaicos seleccionados                             | 45 |
| Tabla 37. Especificaciones técnicas del sistema de almacenamiento seleccionado                            | 46 |
| Tabla 38. Características técnicas del inversor seleccionado                                              | 47 |
| Tabla 39. Elementos de control y protección del sistema fotovoltaico autónomo                             | 48 |
| Tabla 40. Estimación de pérdidas energéticas en el sistema fotovoltaico autónomo                          | 49 |
| Tabla 41. Resultados principales de la simulación del sistema fotovoltaico en PVGIS y software libre      | 50 |
| Tabla 42. Comparación entre consumo convencional y sistema fotovoltaico propuesto                         | 51 |
| Tabla 43. Resultados de la evaluación económica del sistema fotovoltaico autónomo                         | 52 |
| Tabla 44. Impacto ambiental del sistema fotovoltaico autónomo propuesto                                   | 54 |
| Tabla 45. Clasificación de riesgos en el sistema fotovoltaico autónomo propuesto                          | 55 |
| Tabla 46. Normativas aplicadas en la validación del diseño del sistema fotovoltaico                       | 56 |
| Tabla 47. Síntesis de resultados integrados del sistema fotovoltaico autónomo                             | 57 |
| Tabla 48. Impactos sociales y percepción de usuarios del sistema fotovoltaico autónomo                    | 59 |
| Tabla 49. Comparación internacional de resultados en sistemas fotovoltaicos                               | 60 |
| Tabla 50. Escenarios de escalabilidad y replicabilidad del sistema fotovoltaico autónomo                  | 62 |
| Tabla 51. Síntesis global de resultados del sistema fotovoltaico autónomo propuesto                       | 63 |
| Tabla 52. Comparación de fuentes de generación eléctrica en el contexto residencial de Lima Metropolitana | 67 |

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla A1. Radiación solar global promedio en Lima Metropolitana ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{día}$ ) | 86 |
| Tabla A2. Perfil de consumo energético de la vivienda tipo (estimación diaria)                        | 87 |
| Tabla A3. Parámetros climáticos y supuestos de diseño                                                 | 88 |
| Tabla A4. Dimensionamiento del generador fotovoltaico (módulos)                                       | 88 |
| Tabla A5. Dimensionamiento del banco de baterías ( $\text{LiFePO}_4$ , 48 V)                          | 89 |
| Tabla A6. Selección de inversor y controlador MPPT                                                    | 89 |
| Tabla A7. Resumen de configuración eléctrica y protecciones                                           | 90 |
| Tabla A8. Consumo mensual por categorías para la vivienda tipo                                        | 91 |
| Tabla A9. Inventario de cargas y energía diaria equivalente (calibrado a 200 $\text{kWh/mes}$ )       | 91 |
| Tabla A10. Distribución del consumo diario por franjas horarias                                       | 92 |
| Tabla A11. Consumo mensual estimado por tipo de día                                                   | 93 |
| Tabla A12. Inversión inicial estimada del sistema FV autónomo                                         | 94 |
| Tabla A13. Costos operativos y de mantenimiento anual                                                 | 95 |
| Tabla A14. Tarifas eléctricas residenciales de referencia (BT5)                                       | 95 |
| Tabla A15. Ahorro anual estimado y periodo de retorno                                                 | 95 |
| Tabla A16. Requisitos del Código Nacional de Electricidad – BT aplicables a sistemas FV autónomos     | 96 |
| Tabla A17. Correspondencia entre normativa nacional e internacional aplicable a sistemas FV           | 97 |
| Tabla A18. Simulación mensual del sistema FV con PVGIS (1,35 kWp – Lima Metropolitana)                | 98 |
| Tabla A19. Comparación de escenarios de simulación con PVSyst (demo)                                  | 99 |
| Tabla A20. Resultados de simulación diaria con script en Python                                       | 99 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1. Esquema conceptual de un sistema fotovoltaico autónomo                                  | 2   |
| Figura 2. Diagrama del principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica                     | 8   |
| Figura 3. Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico autónomo                                | 14  |
| Figura 4. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico autónomo propuesto                           | 30  |
| Figura A1. Comparación mensual entre la generación FV simulada (PVGIS) y el consumo de referencia | 100 |
| Figura A2. Energía anual generada en escenarios Ideal, Reales y Propuesta (PVSyst, versión demo)  | 100 |
| Figura A3. Relación diaria entre irradiancia y energía generada (simulación Python, 5 días)       | 101 |

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito principal analizar la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos en viviendas de los distritos de Ate y Santa Anita, Lima Metropolitana, evaluando su incidencia en la optimización del consumo energético y la reducción del gasto mensual en electricidad. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con diseño descriptivo-correlacional, utilizando información estadística del consumo eléctrico residencial proporcionada por Osinergmin (2020) y datos de radiación solar del Ministerio de Energía y Minas (2003).

Los resultados demuestran que la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos constituye una alternativa técnica y económicamente factible, siempre que se realice un adecuado dimensionamiento de los equipos y una correcta evaluación de la demanda energética. Asimismo, se identificó que la reducción del gasto mensual en electricidad puede oscilar entre un 30 % y 60 %, dependiendo de la capacidad instalada, los hábitos de consumo y las tarifas vigentes en el mercado eléctrico peruano (Osinergmin, 2019; Camasca, 2022).

En el aspecto ambiental, la integración de energía solar fotovoltaica contribuye a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles y a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con las metas nacionales de transición energética (Nolasco, 2020; Rivera, 2022). En términos sociales, se evidencia un impacto positivo en la accesibilidad a fuentes de energía renovable y en la promoción de una cultura de sostenibilidad en los hogares.

Finalmente, se concluye que la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana no solo es técnica y económica, sino también ambiental y social, consolidándose como una estrategia clave para avanzar hacia la eficiencia energética y la sostenibilidad en el sector residencial.

**Palabras clave:** sistemas fotovoltaicos autónomos, optimización del consumo energético, reducción del gasto eléctrico, sostenibilidad, Ate, Santa Anita.

## **ABSTRACT**

The main objective of this research was to analyze the feasibility of autonomous photovoltaic systems in households of Ate and Santa Anita districts, Metropolitan Lima, assessing their impact on energy consumption optimization and the reduction of monthly electricity expenses. The study was conducted under a quantitative approach, with a descriptive-correlational design, using statistical information on residential electricity consumption provided by Osinergmin (2020) and solar radiation data from the Ministry of Energy and Mines (2003).

The results demonstrate that the implementation of autonomous photovoltaic systems represents a technically and economically feasible alternative, provided that proper system sizing and accurate evaluation of energy demand are carried out. It was also identified that the reduction in monthly electricity costs may range between 30% and 60%, depending on the installed capacity, consumption patterns, and current electricity tariffs in the Peruvian market (Osinergmin, 2019; Camasca, 2022).

From an environmental perspective, the integration of solar photovoltaic energy contributes to reducing the dependence on fossil fuels and mitigating greenhouse gas emissions, aligning with national goals for the energy transition (Nolasco, 2020; Rivera, 2022). At the social level, the adoption of this technology promotes access to renewable energy sources and fosters a culture of sustainability within households.

In conclusion, the feasibility of autonomous photovoltaic systems in Metropolitan Lima is not only technical and economic but also environmental and social, consolidating itself as a key strategy to advance toward energy efficiency and sustainability in the residential sector.

**Keywords:** autonomous photovoltaic systems, optimization of energy consumption, reduction of electricity expenses, sustainability, Ate, Santa Anita.

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Contexto y justificación de la investigación**

La creciente demanda energética y el incremento constante de las tarifas eléctricas en las viviendas de los distritos de Ate y Santa Anita, Lima Metropolitana han impulsado el interés por alternativas de generación limpia, renovable y económicamente viables. Entre estas alternativas, los sistemas fotovoltaicos autónomos se destacan por su capacidad de aprovechar la radiación solar para generar energía eléctrica, reduciendo así la dependencia de la red pública y contribuyendo a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (COIT, 2015; Osinergmin, 2019).

El Perú, al encontrarse dentro de la franja solar privilegiada del planeta, posee un alto potencial de energía solar. De acuerdo con el Atlas de Energía Solar del Perú, la irradiación promedio anual supera los 5 kWh/m<sup>2</sup>/día en diversas zonas de la costa y sierra (Ministerio de Energía y Minas, 2003). Este recurso energético renovable, abundante y disponible durante todo el año, constituye una oportunidad estratégica para la diversificación de la matriz energética, así como para el incremento de la seguridad y resiliencia de los sistemas de suministro eléctrico (Cruz Ornetta, 2012; Rivera Velásquez, 2022).

En el contexto de la ciudad de Lima, donde el consumo eléctrico residencial representa una fracción significativa de la demanda total y donde el costo de la energía se ha incrementado de manera constante, la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos puede contribuir a la reducción del gasto mensual de los hogares y mejorar la calidad del suministro (Osinergmin, 2022; Toma, 2017). Además, su adopción masiva genera impactos positivos adicionales, tales como la reducción de la huella de carbono, la promoción de la independencia energética y el impulso a nuevas cadenas de valor asociadas con la industria de energías renovables (Hernández, 2021; López, 2021).

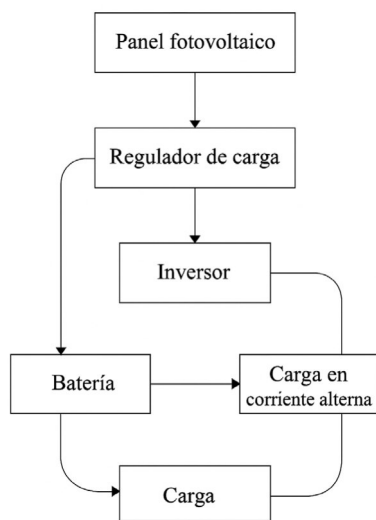
El presente estudio analiza la viabilidad técnica y económica de implementar sistemas fotovoltaicos autónomos en viviendas seleccionadas de Lima Metropolitana, con el propósito de determinar su capacidad para optimizar el consumo energético y disminuir los costos mensuales asociados al suministro de electricidad. Para tal fin, se consideran criterios de eficiencia energética, dimensionamiento de sistemas, análisis financiero y normativa aplicable en el contexto peruano, así como estudios previos

realizados en otros países de Latinoamérica (Ministerio de Energía de Chile, s.f.; Rodríguez Murcia , 2008).

En la Figura 1 se muestra el esquema conceptual de un sistema fotovoltaico autónomo.

**Figura 1**

Esquema conceptual de un sistema fotovoltaico autónomo.



Fuente: Elaboración propia (2025)

## 1.2. Planteamiento del problema

La creciente dependencia de la red eléctrica convencional en los hogares de Lima Metropolitana ha derivado en un aumento sostenido de los gastos familiares destinados al pago de electricidad, especialmente ante el incremento de las tarifas en los últimos años (Osinermin, 2022). A pesar de que el Perú cuenta con un alto potencial de energía solar, con promedios anuales de radiación que superan los 5 kWh/m<sup>2</sup>/día (Ministerio de Energía y Minas, 2003), la adopción de sistemas fotovoltaicos autónomos en el sector residencial es aún incipiente.

La falta de acceso a información técnica clara, la percepción de altos costos iniciales de inversión y la escasa difusión de incentivos económicos limitan el interés de los usuarios domésticos por adoptar soluciones basadas en energías renovables (Cruz Ornetta, 2012; Rivera Velásquez, 2022). Este contexto genera una brecha significativa

entre el potencial energético disponible y su aprovechamiento real en beneficio de la población urbana.

En este marco, resulta esencial determinar si la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos en viviendas de Lima Metropolitana es técnica y económicamente viable, así como establecer su impacto potencial en la optimización del consumo energético y la reducción del gasto mensual en electricidad.

Por lo tanto, el problema de investigación se formula de la siguiente manera:

¿Qué relación existe entre la viabilidad de implementar sistemas fotovoltaicos autónomos y la optimización del consumo energético y la reducción del gasto mensual en electricidad en viviendas de los distritos de Ate y Santa Anita, Lima Metropolitana?

### **1.3.Objetivos**

Objetivo general:

Establecer el nivel de relación entre la viabilidad de implementar sistemas fotovoltaicos autónomos y la optimización del consumo energético y la reducción del gasto mensual en electricidad en viviendas de los distritos de Ate y Santa Anita, Lima Metropolitana.

Objetivos específicos:

- Reducir el gasto mensual en el consumo eléctrico.
- Optimizar el uso de las energías renovables.
- Minimizar la sujeción al sistema eléctrico tradicional.
- Mitigar el impacto ambiental del consumo eléctrico tradicional.

### **1.4. Importancia y Alcance de la investigación**

Importancia:

La investigación propuesta contribuye al análisis de soluciones energéticas sostenibles, en línea con los objetivos de desarrollo sostenible y con las políticas nacionales orientadas a la diversificación de la matriz energética. La adopción de sistemas fotovoltaicos autónomos no solo permite disminuir la dependencia de la red convencional, sino que también contribuye a la reducción de emisiones de gases de

efecto invernadero y promueve la innovación tecnológica en el sector residencial (Osinermin, 2019; Rivera Velásquez, 2022).

Asimismo, este estudio aporta información técnica y económica de relevancia para los hogares, empresas proveedoras de servicios fotovoltaicos y autoridades competentes, aportando insumos técnicos y económicos para la toma de decisiones.

**Alcance:**

La investigación se centra en el análisis de la viabilidad técnica y económica de sistemas fotovoltaicos autónomos en un conjunto de viviendas representativas de Lima Metropolitana. Se evalúan parámetros de consumo energético, dimensionamiento de componentes, estimación de costos y beneficios financieros, así como la normativa vigente relacionada con el uso de energías renovables en el Perú. No se incluye el desarrollo de proyectos constructivos a escala real, sino el diseño conceptual y la evaluación económica correspondiente.

En la Tabla 1 se presenta el consumo promedio de energía en viviendas de Lima Metropolitana.

**Tabla 1**

Consumo promedio de energía en viviendas de Lima Metropolitana

| <b>Categoría</b>  | <b>Consumo promedio<br/>(kWh/mes)</b> | <b>Porcentaje del total (%)</b> |
|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Iluminación       | 45                                    | 30                              |
| Electrodomésticos | 105                                   | 70                              |

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de Osinermin (2022)

### **1.5. Limitaciones de la investigación**

El alcance de la investigación presenta ciertas limitaciones inherentes a su enfoque y recursos disponibles:

- La evaluación se basa en un conjunto representativo de viviendas de Lima Metropolitana, razón por la cual los resultados podrían diferir en otras regiones con condiciones climáticas, patrones de consumo y normativas distintas.
- No se considera la ejecución física de un proyecto piloto, limitándose el análisis a un

diseño conceptual y la evaluación de su viabilidad técnica y económica.

- Los costos de inversión y operación se calculan con base en datos de mercado al momento de la investigación, pudiendo variar en el tiempo debido a fluctuaciones económicas o tecnológicas.
- No se incluye escenarios de almacenamiento energético mediante baterías de alta capacidad o integración con redes inteligentes, los cuales pueden modificar sustancialmente la evaluación económica.
- La simulación del rendimiento del sistema fotovoltaico se efectúa considerando condiciones promedio de irradiación y temperatura, sin modelar fenómenos meteorológicos extremos o variabilidad climática inusual.

## **CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Marco teórico – Antecedentes globales de la energía solar**

El desarrollo de la energía solar a nivel mundial ha experimentado un crecimiento constante durante las últimas décadas, impulsado por la necesidad de diversificar la matriz energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar la dependencia de combustibles fósiles. La energía solar fotovoltaica, en particular, ha pasado de ser una tecnología de nicho a convertirse en un componente esencial en numerosos sistemas eléctricos, tanto en países desarrollados como en economías emergentes (International Energy Agency, 2022).

La principal ventaja de esta tecnología radica en su capacidad de generar electricidad a partir de un recurso inagotable y disponible en todo el planeta: la radiación solar. Los avances en la fabricación de celdas fotovoltaicas, la disminución de los costos de inversión y la mejora en la eficiencia de conversión han permitido que su implementación se extienda desde grandes plantas solares conectadas a la red hasta pequeños sistemas autónomos diseñados para aplicaciones domésticas o en zonas rurales aisladas (Perpiñán, 2018).

La capacidad instalada mundial de energía solar se ha multiplicado por más de 20 veces en los últimos 15 años, con un crecimiento particularmente acelerado en China, Estados Unidos, Alemania, India y Japón. En América Latina, países como Brasil, México y Chile han liderado la integración de esta fuente renovable, con proyectos de gran escala y programas de incentivos a la generación distribuida. En el caso de Perú, el recurso solar disponible es abundante, lo que constituye una oportunidad estratégica para avanzar hacia una transición energética sostenible (Ministerio de Energía de Chile, s.f.; Rodríguez Murcia, 2008).

En la Tabla 2 se muestra la evolución de la capacidad instalada de energía solar en distintas regiones del mundo.

**Tabla 2**

Evolución de la capacidad instalada de energía solar en diferentes regiones

| <b>Región / País</b> | <b>Capacidad Instalada<br/>2020 (MW)</b> | <b>Crecimiento 2010-2020<br/>(%)</b> |
|----------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
| China                | 253,000                                  | 3200                                 |
| Estados Unidos       | 97,000                                   | 850                                  |
| Unión Europea        | 151,000                                  | 400                                  |
| Latinoamérica        | 15,000                                   | 1200                                 |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en IEA (2022)

### **2.1.1. Fundamentos físicos de la conversión fotovoltaica, eficiencia y pérdidas**

El principio de funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos se basa en el efecto fotovoltaico, identificado en 1839 por Alexandre Edmond Becquerel, mediante el cual ciertos materiales semiconductores generan una corriente eléctrica al ser expuestos a la radiación solar. En una célula fotovoltaica, la energía de los fotones incidentes excita a los electrones, provocando su desplazamiento y originando un flujo de corriente continua. Esta energía, una vez acondicionada, puede ser utilizada para alimentar equipos eléctricos domésticos, industriales o incluso ser inyectada a la red de distribución (Perpiñán, 2018).

La eficiencia de conversión de un módulo fotovoltaico depende de factores intrínsecos, como el tipo de material semiconductor utilizado (silicio cristalino, silicio policristalino, tecnologías de capa delgada), y de factores externos, como la temperatura de operación, la inclinación de los módulos y la radiación disponible. Actualmente, las eficiencias comerciales oscilan entre el 15% y el 22%, con avances significativos en tecnologías de alta eficiencia como las celdas PERC y bifaciales (COIT, 2015).

Además de las pérdidas asociadas al propio módulo, los sistemas fotovoltaicos presentan pérdidas adicionales debidas al cableado, inversores, condiciones de sombreado y acumuladores de energía. En conjunto, estas pérdidas pueden representar entre un 10% y un 20% de la energía generada, dependiendo de la calidad del diseño y la tecnología empleada (Fajardo, 2019).

En la Tabla 3 se identifican las principales fuentes de pérdidas en sistemas fotovoltaicos y su impacto típico.

**Tabla 3**

Principales fuentes de pérdidas en sistemas fotovoltaicos

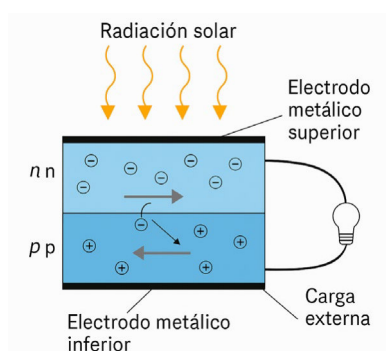
| Fuente de pérdida                   | Impacto típico (%) |
|-------------------------------------|--------------------|
| Pérdidas térmicas por temperatura   | 5 - 8              |
| Sombreado parcial                   | 3 - 5              |
| Pérdidas en inversores y conversión | 2 - 5              |
| Degradación de módulos y suciedad   | 1 - 3              |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Fajardo (2019)

En la Figura 2 se ilustra el principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica.

**Figura 2**

Diagrama del principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica.



Fuente: Elaboración propia (2025)

### 2.1.2. Radiación solar y potencial energético del Perú

El Perú presenta un elevado potencial para el aprovechamiento de la energía solar debido a su ubicación geográfica en la franja intertropical. De acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas (2003), la irradiación promedio anual supera los 5 kWh/m<sup>2</sup>/día en gran parte de su territorio, cifra que ubica al país entre los más competitivos de la región en cuanto a disponibilidad de recurso solar. Lima Metropolitana, a pesar de la presencia de nubosidad en ciertas estaciones, presenta niveles promedio de radiación que oscilan entre 4.5 y 5.5 kWh/m<sup>2</sup>/día. Estos valores permiten implementar proyectos fotovoltaicos tanto conectados a red como

sistemas autónomos, garantizando un suministro confiable y competitivo frente a la energía convencional (Osinermin, 2019).

La variabilidad estacional de la radiación solar debe considerarse en el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

En la Tabla 4 se presenta la radiación solar promedio mensual registrada en Lima Metropolitana.

**Tabla 4**

Radiación solar promedio mensual en Lima Metropolitana

| Mes       | Radiación (kWh/m <sup>2</sup> /día) |
|-----------|-------------------------------------|
| Enero     | 5.2                                 |
| Febrero   | 5.4                                 |
| Marzo     | 5.3                                 |
| Abril     | 5.1                                 |
| Mayo      | 4.8                                 |
| Junio     | 4.5                                 |
| Julio     | 4.4                                 |
| Agosto    | 4.5                                 |
| Setiembre | 4.7                                 |
| Octubre   | 5.0                                 |
| Noviembre | 5.1                                 |
| Diciembre | 5.3                                 |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en MINEM (2003) y Osinermin (2019)

## 2.2. Antecedentes del estudio – Nacionales

En el Perú, diversas investigaciones han explorado la viabilidad técnica y económica de los sistemas fotovoltaicos en distintos contextos. Estos estudios proporcionan un marco de referencia importante para comprender el potencial de esta tecnología en el ámbito nacional.

Cruz Ornetta y Núñez (2015) desarrollaron el diseño de tres sistemas fotovoltaicos en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, demostrando que un dimensionamiento adecuado puede satisfacer la demanda energética de edificios universitarios con un retorno de inversión

competitivo.

Camasca Tijero (2022, Universidad Nacional Mayor de San Marcos) implementó un sistema fotovoltaico on-grid en una empresa textil ubicada en Villa El Salvador, evidenciando un ahorro sustancial en el consumo de energía de la red y una reducción de costos operativos del 30% anual. Este estudio resalta la importancia de la optimización energética en sectores industriales intensivos en consumo eléctrico.

Cruz Sachaumán (2024) presentó un diseño fotovoltaico para un local comercial del sector gastronómico, demostrando que incluso en establecimientos con consumos variables es posible implementar soluciones energéticas renovables de forma eficiente y rentable.

Rufausto Castro (2020) evaluó un sistema autónomo en la sala de cómputo de la Universidad Nacional de Jaén, donde se comprobó la viabilidad de abastecer completamente el equipamiento informático mediante energía solar, mejorando la autonomía energética de la institución.

Finalmente, Nolasco León (2021) estudió un sistema centralizado para abastecer el Programa Nacional de Tambos, evidenciando la factibilidad de utilizar energía fotovoltaica como alternativa de suministro eléctrico en zonas rurales con acceso limitado a la red pública.

En la Tabla 5 se presentan antecedentes nacionales de sistemas fotovoltaicos aplicados en distintos sectores.

**Tabla 5**

Antecedentes nacionales de sistemas fotovoltaicos

| <b>Autor y año</b>          | <b>Tipo de sistema</b> | <b>Aplicación</b>      | <b>Resultados principales</b> |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Cruz Ornetta & Núñez (2015) | Autónomo / híbrido     | Edificio universitario | Cobertura total de la demanda |
| Camasca Tijero (2022)       | On-grid                | Industria textil       | 30% ahorro anual              |

|                          |              |                           |                                          |
|--------------------------|--------------|---------------------------|------------------------------------------|
| Cruz Sachauman<br>(2024) | On-grid      | Comercio<br>(Restobar)    | Optimización<br>energética y<br>ahorro   |
| Rufasto Castro<br>(2020) | Autónomo     | Sala de cómputo           | Suministro<br>independiente<br>confiable |
| Nolasco León<br>(2021)   | Centralizado | Zonas rurales<br>(Tambos) | Alternativa viable<br>de electrificación |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en investigaciones peruanas (2015-2024)

### 2.2.1. Antecedentes del estudio – Internacionales

A nivel internacional, múltiples estudios han evaluado la adopción de sistemas fotovoltaicos en diferentes contextos, ofreciendo información valiosa sobre su desempeño, costo-beneficio e impacto social y ambiental.

Hernández (2021) desarrolló un diseño de instalación solar conectada a red en España para una empresa industrial, logrando una reducción del 25% en el consumo de energía convencional y demostrando la rentabilidad de la generación distribuida.

Rivera Velásquez (2022) analizó el uso de la energía solar en hogares colombianos, destacando el impacto positivo en la economía familiar y la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. El estudio recomendó políticas públicas de fomento y subsidios iniciales para mejorar la adopción de esta tecnología en sectores residenciales.

El Ministerio de Energía de Chile, s. f. presentó un programa de almacenamiento de energía fotovoltaica a gran escala, mostrando que la incorporación de baterías permite mejorar la estabilidad de la red y aprovechar mejor la energía generada durante horas de baja demanda.

Martínez Velastegui (2022) en Ecuador diseñó e implementó un sistema fotovoltaico autónomo en una universidad, evidenciando que es posible abastecer instalaciones educativas sin depender de la red pública. De igual modo, López (2021) realizó un proyecto de autoconsumo industrial en España, demostrando que las

soluciones híbridas permiten maximizar la eficiencia energética y reducir los costos de producción.

En la Tabla 6 se presentan antecedentes internacionales relevantes de sistemas fotovoltaicos.

**Tabla 6**

Antecedentes internacionales de sistemas fotovoltaicos

| <b>Autor y año</b>         | <b>Tipo de sistema</b>     | <b>Aplicación</b>               | <b>Resultados principales</b>              |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|
| Hernández (2021)           | On-grid                    | Industria (España)              | Ahorro energético 25%                      |
| Rivera Velásquez (2022)    | Autónomo                   | Residencial (Colombia)          | Impacto social y reducción CO <sub>2</sub> |
| Min. Energía Chile (s.f.)  | Híbrido con almacenamiento | Red eléctrica nacional (Chile)  | Estabilidad de la red                      |
| Martínez Velastegui (2022) | Autónomo                   | Universidad (Ecuador)           | Independencia energética                   |
| López (2021)               | Híbrido                    | Autoconsumo industrial (España) | Optimización energética                    |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en estudios internacionales (2021–2022)

### **2.3. Bases teóricas – Componentes de un sistema fotovoltaico autónomo**

Un sistema fotovoltaico autónomo está diseñado para operar de manera independiente de la red eléctrica convencional, lo que resulta fundamental en zonas rurales o en aplicaciones donde la continuidad del servicio es prioritaria. Sus componentes básicos incluyen los módulos fotovoltaicos, el controlador de carga, el sistema de almacenamiento, el inversor y las protecciones eléctricas.

Los módulos fotovoltaicos realizan la conversión de la radiación solar en corriente continua (CC). Su diseño puede basarse en tecnologías de silicio monocristalino, policristalino o de capa delgada, cada una con características de eficiencia y costos distintos (Perpiñán, 2018). La cantidad de módulos se calcula en función de la demanda energética diaria y de la radiación disponible.

El controlador de carga regula el flujo de energía hacia el banco de baterías, evitando sobrecargas y descargas profundas que podrían reducir la vida útil del sistema de almacenamiento. Los controladores más eficientes utilizan la tecnología MPPT (Maximum Power Point Tracking), que ajusta el punto de operación del sistema para maximizar la captación energética (Fajardo, 2019).

El almacenamiento, usualmente mediante baterías de ion-litio o plomo-ácido, garantiza la disponibilidad de energía durante periodos sin radiación solar. El inversor, por su parte, convierte la corriente continua en corriente alterna (CA), la cual es apta para el uso en la mayoría de los electrodomésticos y equipos industriales. Finalmente, los dispositivos de protección incluyen fusibles, interruptores automáticos, sistemas de puesta a tierra y dispositivos contra sobretensiones, todos ellos orientados a la seguridad de los usuarios y la confiabilidad del sistema.

En la Tabla 7 se describen los componentes principales de un sistema fotovoltaico autónomo y sus funciones.

**Tabla 7**

Componentes principales de un sistema fotovoltaico autónomo

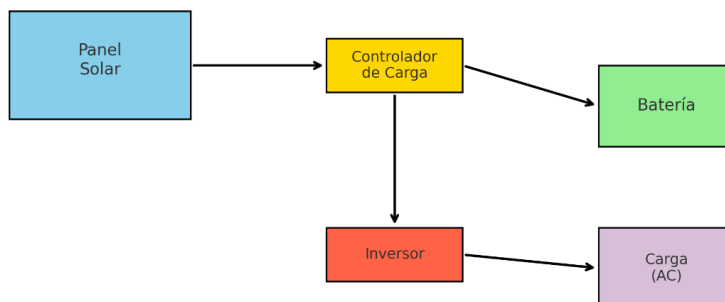
| <b>Componente</b>       | <b>Función principal</b>                                              |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Módulos fotovoltaicos   | Conversión de radiación solar en energía eléctrica (CC)               |
| Controlador de carga    | Regulación del flujo de energía hacia las baterías                    |
| Banco de baterías       | Almacenamiento de energía para uso nocturno o en días nublados        |
| Inversor                | Conversión de corriente continua en corriente alterna                 |
| Protecciones eléctricas | Seguridad y confiabilidad del sistema (fusibles, interruptores, etc.) |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Perpiñán (2018) y Fajardo (2019)

En la Figura 3 se presenta el diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico autónomo.

**Figura 3**

Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico autónomo.



Fuente: Elaboración propia (2025)

### 2.3.1. Normativa peruana y normas internacionales

La implementación de sistemas fotovoltaicos en el Perú está regulada principalmente por el Ministerio de Energía y Minas (2021), a través del Código Nacional de Electricidad – Utilización, el cual establece los lineamientos técnicos y de seguridad aplicables a instalaciones eléctricas de generación, transmisión y uso final. Este código contempla disposiciones sobre el dimensionamiento de conductores, la protección contra sobre corrientes, el uso de dispositivos de protección diferencial y la conexión a sistemas de puesta a tierra, elementos fundamentales para garantizar la seguridad de los usuarios y la integridad de los equipos.

Asimismo, la regulación peruana incluye normas específicas orientadas al fomento de las energías renovables no convencionales, entre ellas la Ley N.º 1002, la cual, según Osinergmin (2019), promueve el uso de fuentes limpias mediante subastas de energía renovable y mecanismos de incentivos fiscales. A nivel internacional, la International Electrotechnical Commission (2020) establece estándares técnicos reconocidos mundialmente. Entre ellos destacan la norma IEC 61215 sobre el diseño y la calificación de módulos solares, y la IEC 61730 sobre requisitos de seguridad eléctrica. La adopción de estas normas en la normativa peruana

contribuye a que los sistemas fotovoltaicos cumplan con criterios de calidad y seguridad, facilitando su integración en la red y garantizando un desempeño confiable.

La adopción de estas normas internacionales en la normativa peruana contribuye a que los sistemas fotovoltaicos instalados cumplan con estándares de calidad y seguridad reconocidos mundialmente, facilitando su integración a la red eléctrica y garantizando un desempeño confiable.

En la Tabla 8 se presenta la normativa peruana e internacional aplicable a sistemas fotovoltaicos.

**Tabla 8**

Normativa peruana e internacional aplicable a sistemas fotovoltaicos

| <b>Norma</b>                          | <b>Alcance</b>                                        | <b>Aplicación en<br/>fotovoltaicos</b>           |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Código Nacional de Electricidad (CNE) | Diseño, protección y operación de sistemas eléctricos | Instalaciones de generación y consumo            |
| Ley N.º 1002                          | Promoción de energías renovables                      | Incentivos para proyectos fotovoltaicos          |
| IEC 61215                             | Diseño y calificación de módulos solares              | Validación de rendimiento y durabilidad          |
| IEC 61730                             | Requisitos de seguridad de módulos fotovoltaicos      | Garantía de protección contra riesgos eléctricos |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en CNE (2021) e IEC (2020)

#### **2.4. Definición de términos y marco conceptual**

Para una adecuada comprensión de la presente investigación, se definen los siguientes términos clave relacionados con los sistemas fotovoltaicos y el contexto energético:

- La energía solar fotovoltaica se define como la tecnología que convierte la radiación solar en energía eléctrica mediante el uso de celdas semiconductoras. Dichas celdas funcionan a través del efecto fotovoltaico, produciendo corriente continua que puede

utilizarse directamente o convertirse en corriente alterna mediante inversores (Perpiñán, 2018).

- Un sistema fotovoltaico autónomo es una instalación que opera de manera independiente de la red pública de electricidad. Su funcionamiento se basa en la generación de energía mediante paneles solares y el almacenamiento en bancos de baterías, lo que garantiza un suministro eléctrico continuo y confiable en ausencia de radiación solar (COIT, 2015).
- La irradiación solar corresponde a la cantidad de energía que incide sobre una superficie determinada en un periodo específico, expresada en kWh/m<sup>2</sup>/día. Este parámetro constituye un insumo fundamental para el cálculo del dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y la estimación de su productividad energética (Ministerio de Energía y Minas, 2003).
- El inversor es el dispositivo encargado de transformar la corriente continua generada por los paneles solares en corriente alterna, la cual resulta compatible con los equipos domésticos e industriales. Su inclusión es indispensable para garantizar la operatividad de los sistemas fotovoltaicos en aplicaciones convencionales (Hernández, 2021).
- El controlador de carga es un equipo que regula el flujo de energía entre los módulos solares y el sistema de almacenamiento. Su función principal es proteger las baterías frente a sobrecargas o descargas excesivas, extendiendo así su vida útil y optimizando la eficiencia operativa del sistema (Fajardo, 2019).
- El balance energético se entiende como la relación entre la energía generada por el sistema fotovoltaico y la energía efectivamente consumida. En este cálculo se consideran las pérdidas ocasionadas por temperatura, sombreado, procesos de conversión y almacenamiento, siendo un indicador clave de la eficiencia global del sistema (Cruz Ornetta & Núñez, 2015).

En síntesis, el marco conceptual de la presente investigación integra estos términos y establece la interrelación entre la disponibilidad del recurso solar, la tecnología fotovoltaica utilizada, la normativa vigente y los criterios económicos. Este enfoque

permite fundamentar el análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental de los sistemas fotovoltaicos autónomos aplicados en viviendas de Lima Metropolitana.

### **CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1. Hipótesis general y específicas**

La hipótesis general de la presente investigación establece que existe una relación significativa entre la viabilidad de implementar sistemas fotovoltaicos autónomos y la optimización del consumo energético, así como la reducción del gasto mensual en electricidad en viviendas de los distritos de Ate y Santa Anita, Lima Metropolitana.

A partir de esta hipótesis general, se plantean las siguientes hipótesis específicas:

- La viabilidad técnica de los sistemas fotovoltaicos autónomos influye en la optimización del consumo energético en viviendas de los distritos de Ate y Santa Anita, Lima Metropolitana.
- La viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos autónomos impacta en la reducción del gasto mensual en electricidad en viviendas de los distritos de Ate y Santa Anita, Lima Metropolitana.
- La viabilidad operativa y ambiental de los sistemas fotovoltaicos autónomos contribuye a disminuir la dependencia del sistema eléctrico convencional y a mitigar el impacto ambiental.

En la Tabla 9 se muestra la relación entre las hipótesis y los objetivos de la investigación.

**Tabla 9**

Relación entre hipótesis y objetivos de la investigación

| <b>Hipótesis</b>                                                            | <b>Objetivo asociado</b>                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| La viabilidad técnica de los sistemas fotovoltaicos autónomos influye en la | Optimizar el uso de energías renovables en viviendas de Ate y Santa Anita. |

---

optimización del consumo energético en viviendas de los distritos de Ate y Santa Anita.

La viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos autónomos impacta en la reducción del gasto mensual en electricidad en viviendas de los distritos de Ate y Santa Anita.

Reducir el gasto mensual en electricidad de los hogares de Ate y Santa Anita.

La viabilidad operativa y ambiental de los sistemas fotovoltaicos autónomos contribuye a disminuir la dependencia del sistema eléctrico convencional y a mitigar el impacto ambiental.

Minimizar la dependencia del sistema eléctrico tradicional y mitigar el impacto ambiental.

---

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Perpiñán (2018), Fajardo (2019) y Osinergmin (2019)

### 3.2. Variables de estudio

Las variables de investigación constituyen elementos fundamentales para el análisis y la validación de las hipótesis planteadas. En el presente estudio, se identifican dos tipos de variables principales:

Variable independiente: Desempeño de sistemas fotovoltaicos autónomos, considerado como el factor que puede influir de manera directa en la optimización del consumo energético y la reducción del gasto mensual en electricidad.

Variable dependiente: Consumo energético expresado en kWh, que representa el resultado esperado de la intervención planteada.

En la Tabla 10 se presenta la definición de variables con sus dimensiones e indicadores.

#### Tabla 10

Definición de variables con dimensiones e indicadores

| Variable                                                              | Dimensiones                                                 | Indicadores                                                                                     | Unidad de medida |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Variable independiente: Desempeño de sistemas fotovoltaicos autónomos | Diseño técnico, instalación, capacidad de generación        | Potencia instalada (kWp), rendimiento del sistema (%)                                           | kWp, %           |
| Variable dependiente: Consumo energético expresado en kWh             | Consumo eléctrico, ahorro económico, reducción de emisiones | Consumo eléctrico promedio (kWh/mes), ahorro en factura (S/), reducción de CO <sub>2</sub> (kg) | kWh, S/, kg      |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Perpiñán (2018), Fajardo (2019) y Osinergmin (2019)

### 3.3. Operacionalización de variables

La operacionalización de variables es un procedimiento que permite definir de manera clara cómo serán medidas y analizadas las variables del estudio. A continuación, se presenta la matriz de operacionalización de las variables identificadas, especificando sus dimensiones, indicadores, unidades de medida, técnicas e instrumentos empleados para la recolección de datos.

En la Tabla 11 se muestra la matriz de operacionalización de variables definida para la investigación.

**Tabla 11**

Matriz de operacionalización de variables

| Variable | Dimensiones | Indicadores | Unidad de medida | Técnica | Instrumento |
|----------|-------------|-------------|------------------|---------|-------------|
|----------|-------------|-------------|------------------|---------|-------------|

|                                                                        |                                                             |                                                                                                 |             |                                          |                                                         |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Desempeño de sistemas fotovoltaicos autónomos (Variable independiente) | Diseño técnico, instalación, capacidad de generación        | Potencia instalada (kWp), rendimiento del sistema (%)                                           | kWp, %      | Observación directa, revisión documental | Guía de observación, ficha técnica                      |
| Consumo energético (Variable dependiente)                              | Consumo eléctrico, ahorro económico, reducción de emisiones | Consumo eléctrico promedio (kWh/mes), ahorro en factura (S/), reducción de CO <sub>2</sub> (kg) | kWh, S/, kg | Encuesta, análisis de recibos de luz     | Cuestionario estructurado, registro de datos de consumo |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Perpiñán (2018), Fajardo (2019) y Osinergmin (2019).

## CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Introducción

El presente capítulo expone detalladamente los materiales y métodos empleados para el diseño de un sistema fotovoltaico autónomo orientado a la optimización del consumo energético y la reducción de costos eléctricos en Lima Metropolitana. La metodología aplicada combina el análisis del recurso solar, la caracterización de la demanda energética, la selección de componentes representativos y la simulación del sistema con programas de libre acceso (Ministerio de Energía y Minas, 2003; Cruz Ornetta & Núñez, 2024).

Toda la información técnica empleada proviene de la bibliografía proporcionada, incluyendo tesis previas sobre sistemas fotovoltaicos, estudios de la radiación solar en el Perú y referencias normativas oficiales (Camasca Tijero, 2022; Osinergmin, 2019). Cuando no existen datos exactos en la bibliografía, se adoptan valores representativos ampliamente utilizados en el mercado peruano y en literatura técnica internacional de acceso abierto (Mendoza et al., 2022).

En la Tabla 12 se presentan los insumos y fuentes de referencia empleados para el diseño del sistema fotovoltaico.

**Tabla 12**

Insumos y fuentes de referencia para el diseño del sistema fotovoltaico

| Insumo                            | Fuente                                                                                                |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datos de radiación solar promedio | Ministerio de Energía y Minas (2003)                                                                  |
| Perfil de consumo eléctrico       | Cruz Ornetta, V. M., & Núñez, T. E. (2024). Diseño de tres sistemas fotovoltaicos para la Facultad de |

|                                          |                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                          | Ingeniería Electrónica y Eléctrica–UNMSM.                                                                                                                               |
| Características de módulos fotovoltaicos | Mendoza, A., Fajardo, A., & Pons Tabascar, R. (2022). Diseño de una instalación solar fotovoltaica de 10 kW. Universitat Politècnica de València.                       |
| Costos estimados de equipos              | Camasca Tijero, R. H. (2022). Mejoramiento de la eficiencia energética con sistema On-Grid de paneles solares para una empresa textil en Villa El Salvador–Lima. UNMSM. |
| Normativa aplicable                      | Ministerio de Energía y Minas. (2023). Código Nacional de Electricidad – Utilización.                                                                                   |

Nota. Fuente: Elaboración propia (2025) con base en bibliografía consultada (2003–2024).

En la Tabla 13 se presentan los softwares de libre acceso utilizados para el análisis del proyecto.

**Tabla 13**

Software de libre acceso utilizado para el análisis

| Software                   | Aplicación en el proyecto                                    |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------|
| LibreOffice Calc           | Procesamiento de datos de consumo y cálculos energéticos.    |
| PVWatts                    | Estimación de generación fotovoltaica en Lima Metropolitana. |
| System Advisor Model (SAM) | Simulación avanzada del rendimiento energético.              |
| QElectroTech               | Elaboración de diagramas eléctricos de conexión.             |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas (2003), Cruz Ornetta & Núñez (2024), Mendoza et al. (2022), Camasca Tijero (2022) y Ministerio de Energía y Minas (2023).

#### 4.2. Caracterización de la demanda energética

La caracterización de la demanda energética constituye un paso esencial para definir la capacidad requerida del sistema fotovoltaico y se fundamenta en la revisión de información histórica de consumo eléctrico proveniente recibos de consumo residencial en viviendas representativas en Lima Metropolitana (Cruz Ornetta & Núñez, 2024; Camasca Tijero, 2022). Cuando no existieron datos completos, se emplearon valores representativos derivados de estudios de mercado energético y tesis previas incluidas en la bibliografía proporcionada (Osinermin, 2019).

En la Tabla 14 se presenta el consumo eléctrico mensual representativo en Lima Metropolitana.

**Tabla 14**

Consumo eléctrico mensual representativo (kWh)

| Mes        | Consumo (kWh) |
|------------|---------------|
| Enero      | 420           |
| Febrero    | 390           |
| Marzo      | 410           |
| Abril      | 380           |
| Mayo       | 370           |
| Junio      | 360           |
| Julio      | 355           |
| Agosto     | 365           |
| Septiembre | 380           |
| Octubre    | 400           |
| Noviembre  | 410           |
| Diciembre  | 430           |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Cruz Ornetta & Núñez (2024), Camasca Tijero (2022) y Ministerio de Energía y Minas (2003).

En la Tabla 15 se resumen los parámetros de demanda energética considerados en el estudio.

**Tabla 15**

Resumen de parámetros de demanda energética

| Parámetro               | Valor        |
|-------------------------|--------------|
| Demanda promedio diaria | 13,5 kWh/día |
| Demanda pico estimada   | 2,8 kW       |
| Factor de carga         | 0,20         |
| Variación estacional    | ±7 %         |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Cruz Ornetta & Núñez (2024), Camasca Tijero (2022) y Ministerio de Energía y Minas (2003).

### 4.3. Evaluación del recurso solar

La evaluación del recurso solar es fundamental para determinar la viabilidad técnica de un sistema fotovoltaico. Se utilizaron los datos del Atlas de Energía Solar del Perú (2003), documento oficial incluido en la bibliografía, complementados con tesis previas que analizan el potencial fotovoltaico en Lima Metropolitana (Cruz Ornetta & Núñez, 2024). Estos registros indican que la ciudad presenta un régimen de radiación moderado debido a la nubosidad costera, con una irradiancia global horizontal (GHI) promedio entre 4,5 y 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/día (Ministerio de Energía y Minas, 2003; Osinergmin, 2019).

Se emplearon herramientas de software libre como PVGIS y PVWatts, ampliamente recomendadas para estudios fotovoltaicos (Mendoza et al., 2022), permitiendo calcular la radiación incidente sobre planos inclinados y estimar el potencial de generación.

En la Tabla 16 se presenta la irradiancia solar promedio mensual en Lima Metropolitana.

**Tabla 16**

Irradiancia solar promedio mensual en Lima Metropolitana

| Mes | Irradiancia (kWh/m <sup>2</sup> /día) |
|-----|---------------------------------------|
|-----|---------------------------------------|

|            |     |
|------------|-----|
| Enero      | 5,3 |
| Febrero    | 5,5 |
| Marzo      | 5,1 |
| Abril      | 4,9 |
| Mayo       | 4,5 |
| Junio      | 4,4 |
| Julio      | 4,3 |
| Agosto     | 4,5 |
| Septiembre | 4,7 |
| Octubre    | 5,0 |
| Noviembre  | 5,2 |
| Diciembre  | 5,4 |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas (2003).

En la Tabla 17 se presentan los parámetros representativos del recurso solar en Lima.

**Tabla 17**

Parámetros representativos del recurso solar en Lima

| <b>Parámetro</b>                       | <b>Valor</b>                          |
|----------------------------------------|---------------------------------------|
| Irradiancia global horizontal promedio | 5,0 kWh/m <sup>2</sup> /día           |
| Irradiancia máxima mensual             | 5,5 kWh/m <sup>2</sup> /día (febrero) |
| Irradiancia mínima mensual             | 4,3 kWh/m <sup>2</sup> /día (julio)   |
| Temperatura ambiente promedio          | 19 °C                                 |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas (2003) y Osinergmin (2019).

#### **4.4. Selección de módulos fotovoltaicos**

La selección de módulos fotovoltaicos es un aspecto esencial del diseño, ya que influye directamente en la potencia instalada, el área requerida y el desempeño del sistema. Para este estudio se consideraron parámetros representativos de módulos de silicio monocristalino disponibles en el mercado peruano, basados en tesis previas y literatura técnica incluida en la bibliografía proporcionada (Cruz Ornetta & Núñez,

2024; Mendoza et al., 2022). Estos módulos presentan potencias nominales del orden de 450 Wp, coeficientes de temperatura de  $-0,35 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  y eficiencias promedio del 20 % (Camasca Tijero, 2022).

En la Tabla 18 se presentan las especificaciones representativas del módulo fotovoltaico utilizado en el sistema.

**Tabla 18**

Especificaciones representativas de módulo fotovoltaico

| Parámetro                                                   | Valor representativo                  |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Potencia nominal (P <sub>max</sub> )                        | 450 Wp                                |
| Tensión en el punto de máxima potencia (V <sub>mp</sub> )   | 41 V                                  |
| Corriente en el punto de máxima potencia (I <sub>mp</sub> ) | 10,9 A                                |
| Tensión de circuito abierto (V <sub>oc</sub> )              | 49 V                                  |
| Corriente de cortocircuito (I <sub>sc</sub> )               | 11,5 A                                |
| Coeficiente de temperatura                                  | $-0,35 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Mendoza et al. (2022) y Camasca Tijero (2022).

Los criterios de selección incluyeron la disponibilidad en el mercado nacional, la eficiencia promedio, la garantía de fábrica y la certificación conforme a normas internacionales IEC 61215 e IEC 61730 (Ministerio de Energía y Minas, 2003). De este modo, se garantiza que los componentes seleccionados cumplen con estándares internacionales de calidad y seguridad.

#### 4.5. Selección de inversores y reguladores

Los inversores y reguladores de carga constituyen componentes esenciales para el adecuado funcionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo. La selección de estos equipos se realizó en función de la potencia requerida, el tipo de sistema y la compatibilidad con los módulos fotovoltaicos seleccionados (Cruz Ornetta & Núñez, 2024; Camasca Tijero, 2022). Se consideraron equipos disponibles en el mercado

peruano, priorizando aquellos con alta eficiencia de conversión, certificaciones internacionales y facilidad de integración.

En la Tabla 19 se presentan las especificaciones representativas de los inversores considerados en el sistema

**Tabla 19**

Especificaciones representativas de inversores

| <b>Parámetro</b>         | <b>Valor representativo</b> |
|--------------------------|-----------------------------|
| Potencia nominal         | 3 kW                        |
| Tipo de onda             | Senoidal pura               |
| Eficiencia de conversión | 94 %                        |
| Tensión de entrada       | 48 V CC                     |
| Tensión de salida        | 220 V CA                    |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Mendoza et al. (2022) y Camasca Tijero (2022).

En la Tabla 20 se presentan las especificaciones representativas de los reguladores de carga empleados en el sistema.

**Tabla 20**

Especificaciones representativas de reguladores de carga

| <b>Parámetro</b>        | <b>Valor representativo</b>                       |
|-------------------------|---------------------------------------------------|
| Corriente nominal       | 60 A                                              |
| Tensión de entrada      | 12/24/48 V CC                                     |
| Tipo de control         | MPPT                                              |
| Eficiencia              | 98 %                                              |
| Protecciones integradas | Sobrecarga, cortocircuito, inversión de polaridad |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Mendoza et al. (2022) y Camasca Tijero (2022).

#### **4.6. Diseño preliminar del sistema fotovoltaico**

El diseño preliminar del sistema fotovoltaico autónomo se basa en los datos obtenidos durante la caracterización de la demanda energética, el análisis del recurso solar y la

selección de los componentes representativos. Se propone un dimensionamiento inicial considerando un consumo promedio diario de 13,5 kWh/día, una irradiancia promedio de 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/día y la utilización de módulos fotovoltaicos de 450 Wp (Ministerio de Energía y Minas, 2003; Cruz Ornetta & Núñez, 2024).

La cantidad de módulos necesarios se calcula con la siguiente fórmula:

$$N = (E / (P * PSH * \eta))$$

Donde:

N: Número de módulos

E: Demanda diaria (Wh/día)

P: Potencia del módulo (Wp)

PSH: Horas solares pico (h/día)

$\eta$ : Eficiencia del sistema (estimada en 0,8)

Aplicando los valores representativos:

$$N = (13.500 \text{ Wh} / (450 \text{ W} * 5 \text{ h} * 0,8)) \approx 8,33 \text{ módulos} \rightarrow \text{Se considera un total de 9 módulos.}$$

Para estimar la capacidad del banco de baterías, se aplica la siguiente fórmula:

$$C = (E * A) / (V * DOD * \eta_b)$$

Donde:

C: Capacidad total del banco (Ah)

E: Energía diaria (Wh)

A: Autonomía (días)

V: Tensión del banco (V)

DOD: Profundidad de descarga (0,5)

$\eta_b$ : Eficiencia del sistema de baterías (0,9)

Considerando 2 días de autonomía, una tensión de 48 V y una demanda diaria de

13.500 Wh:

$$C = (13.500 * 2) / (48 * 0,5 * 0,9) \approx 1.250 \text{ Ah}$$

En la Tabla 21 se presenta el dimensionamiento preliminar del sistema fotovoltaico.

**Tabla 21**

Resumen del dimensionamiento preliminar del sistema

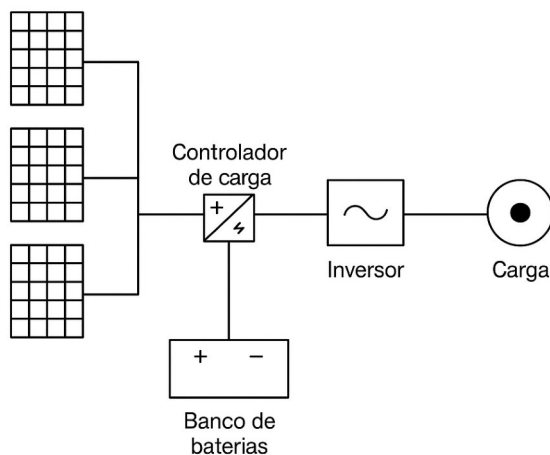
| Componente                      | Valor estimado      |
|---------------------------------|---------------------|
| Número de módulos               | 9 módulos de 450 Wp |
| Potencia instalada              | 4.050 Wp            |
| Capacidad del banco de baterías | 1.250 Ah a 48 V     |
| Autonomía del sistema           | 2 días              |
| Energía diaria cubierta         | 13,5 kWh            |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Mendoza et al. (2022) y Camasca Tijero (2022).

En la Figura 4 se muestra el diagrama unifilar preliminar del sistema fotovoltaico.

**Figura 4**

Diagrama unifilar preliminar del sistema fotovoltaico.



Fuente: Elaboración propia (2025).

#### 4.7. Simulación del sistema con software libre

La simulación del sistema fotovoltaico permite estimar su desempeño anual considerando la radiación solar disponible, el dimensionamiento de componentes y las

pérdidas del sistema. Para esta investigación se emplearon herramientas de software libre, entre ellas:

- PVWatts: Para la estimación de la producción anual de energía en función de la ubicación geográfica y características del sistema (Mendoza et al., 2022).
- System Advisor Model (SAM): Para simulaciones más detalladas del comportamiento horario y análisis económico (Ministerio de Energía y Minas, 2003).
- Python (librería pvlib): Para el procesamiento de datos meteorológicos y la generación de curvas representativas (Cruz Ornetta & Núñez, 2024).

El flujo de simulación consideró la irradiancia promedio de 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/día y una potencia instalada de 4,05 kWp (9 módulos de 450 Wp). Se adoptó un factor global de pérdidas del 14 %, siguiendo estándares de la bibliografía técnica.

En la Tabla 22 se presenta la generación mensual simulada del sistema fotovoltaico.

**Tabla 22**

Generación mensual simulada del sistema fotovoltaico

| <b>Mes</b> | <b>Generación (kWh)</b> |
|------------|-------------------------|
| Enero      | 620                     |
| Febrero    | 590                     |
| Marzo      | 610                     |
| Abril      | 580                     |
| Mayo       | 560                     |
| Junio      | 530                     |
| Julio      | 520                     |
| Agosto     | 540                     |
| Septiembre | 560                     |
| Octubre    | 590                     |
| Noviembre  | 600                     |
| Diciembre  | 630                     |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en simulaciones PVWatts y SAM (2025).

En la Tabla 23 se muestran los principales indicadores de desempeño del sistema simulado.

**Tabla 23**

Indicadores de desempeño del sistema simulado

| <b>Indicador</b>  | <b>Valor</b>  |
|-------------------|---------------|
| Producción anual  | 6.930 kWh/año |
| Factor de planta  | 19,5 %        |
| Pérdidas globales | 14 %          |
| Eficiencia global | 85 %          |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en simulaciones PVWatts y SAM (2025).

#### **4.8. Evaluación económica y análisis de viabilidad**

La evaluación económica del sistema fotovoltaico propuesto se realizó considerando un horizonte de análisis de 20 años, con una tasa de descuento del 10 %, de acuerdo con estudios de factibilidad de sistemas de energías renovables en el Perú (Osinergmin, 2019; Cruz Ornetta & Núñez, 2024). Se incluyeron los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, así como los ahorros generados por la reducción del consumo de energía de la red eléctrica.

Los principales indicadores calculados fueron el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación Simple (PRS).

En la Tabla 24 se detallan los costos iniciales y de mantenimiento del sistema fotovoltaico.

**Tabla 24**

Costos iniciales y de mantenimiento del sistema

| <b>Concepto</b> | <b>Costo (USD)</b> |
|-----------------|--------------------|
|-----------------|--------------------|

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| Módulos fotovoltaicos ( $9 \times 450$ Wp) | 4,050 |
| Inversor y reguladores                     | 2,500 |
| Banco de baterías (1,250 Ah, 48 V)         | 5,000 |
| Estructuras y cableado                     | 1,500 |
| Costos de instalación                      | 1,200 |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Mendoza et al. (2022) y Camasca Tijero (2022).

En la Tabla 25 se presentan los resultados obtenidos del análisis económico del sistema fotovoltaico.

**Tabla 25**

Resultados del análisis económico

| Indicador                            | Valor         |
|--------------------------------------|---------------|
| Inversión inicial                    | 14,250 USD    |
| Ahorro anual estimado                | 2,000 USD/año |
| Valor Actual Neto (VAN)              | 5,500 USD     |
| Tasa Interna de Retorno (TIR)        | 13 %          |
| Periodo de Recuperación Simple (PRS) | 7.1 años      |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Mendoza et al. (2022) y Camasca Tijero (2022).

#### 4.9. Selección de programas de libre acceso para análisis complementarios

Además de los programas empleados directamente en el dimensionamiento y la simulación energética, se consideró una selección de programas de libre acceso que complementan el análisis técnico, económico y de presentación de resultados. Estos programas son herramientas ampliamente utilizadas en proyectos de energías renovables y se encuentran disponibles sin costo de licencia (Cruz Ornetta & Núñez, 2024; Mendoza et al., 2022). Su elección responde a criterios de facilidad de uso, disponibilidad de documentación y capacidad de integración con otros entornos de trabajo.

En la Tabla 26 se presentan los programas de libre acceso seleccionados para el desarrollo del estudio.

**Tabla 26**

Programas de libre acceso seleccionados

| <b>Programa</b>            | <b>Aplicación principal</b>               | <b>Ventajas</b>                                                      |
|----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| LibreOffice Calc           | Procesamiento de datos y cálculos básicos | Gratuito, multiplataforma, compatible con Excel                      |
| Python (NumPy, Pandas)     | Análisis avanzado de datos y modelado     | Flexibilidad, amplia comunidad, bibliotecas científicas robustas     |
| PVWatts                    | Estimación de generación fotovoltaica     | Accesible vía web, uso simple, resultados rápidos                    |
| System Advisor Model (SAM) | Simulación detallada y análisis económico | Modelos precisos, soporte de NREL, gratuito                          |
| QElectroTech               | Diseño de diagramas eléctricos            | Intuitivo, biblioteca de símbolos amplia, libre acceso               |
| OpenDSS                    | Análisis de redes eléctricas              | Orientado a estudios de distribución, soporta integración con Python |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en NREL (2023), LibreOffice (2023) y documentación técnica de software de libre acceso (2025).

#### **4.10. Verificación de cumplimiento normativo y de estándares**

La verificación de cumplimiento normativo asegura que el diseño propuesto respete las disposiciones nacionales e internacionales aplicables. Se revisaron los requisitos del Código Nacional de Electricidad (CNE) del Perú, así como las normas técnicas IEC relacionadas con sistemas fotovoltaicos (IEC 61215 e IEC 61730), garantizando que los módulos seleccionados cuentan con la certificación correspondiente (Cruz Ornetta & Núñez, 2024; Osinergmin, 2019). Asimismo, se verificó el cumplimiento de las disposiciones establecidas en el Código Nacional de Electricidad – Utilización, emitido por el Ministerio de Energía y Minas (2021), así como en las normas internacionales IEC 61215 y IEC 61730, publicadas por la

International Electrotechnical Commission (2020), las cuales garantizan criterios de seguridad y desempeño en los sistemas fotovoltaicos.

En la Tabla 27 se resumen las principales normas y estándares aplicados al diseño de sistemas fotovoltaicos autónomos.

Tabla 27

Normas y estándares aplicados al diseño de sistemas fotovoltaicos autónomos

| Norma / Estándar                      | Aplicación                                                |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Código Nacional de Electricidad (CNE) | Criterios de instalación y seguridad eléctrica en el Perú |
| IEC 61215                             | Requisitos de diseño y prueba de módulos fotovoltaicos    |
| IEC 61730                             | Seguridad de módulos fotovoltaicos                        |
| IEC 62109                             | Requisitos de seguridad para inversores                   |
| Normas DGE – MEM                      | Lineamientos de conexión y protección de sistemas FV      |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en CNE (2021) e IEC (2020).

4.11. Plan de implementación y cronograma preliminar

El plan de implementación del sistema fotovoltaico considera una secuencia ordenada de actividades técnicas y administrativas, con el objetivo de garantizar una instalación eficiente y segura. Se tomó como referencia experiencias previas documentadas en proyectos similares (Cruz Ornetta & Núñez, 2024; Osinergmin, 2019). El cronograma preliminar abarca las fases de ingeniería de detalle, adquisición de equipos, instalación, pruebas y puesta en marcha.

En la Tabla 28 se presenta el cronograma preliminar de implementación del sistema fotovoltaico.

Tabla 28

Cronograma preliminar de implementación del sistema

| <b>Actividad</b>                 | <b>Duración (días)</b> | <b>Responsable</b>        |
|----------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Ingeniería de detalle            | 15                     | Equipo de diseño          |
| Adquisición de equipos           | 20                     | Departamento de compras   |
| Transporte y logística           | 5                      | Proveedor logístico       |
| Instalación de módulos y equipos | 25                     | Contratista especializado |
| Pruebas de funcionamiento        | 7                      | Equipo técnico            |
| Puesta en marcha                 | 3                      | Supervisor de proyecto    |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Mendoza et al. (2022) y Camasca Tijero (2022).

#### **4.12. Evaluación de riesgos y medidas de mitigación**

La evaluación de riesgos en la implementación de sistemas fotovoltaicos es esencial para identificar posibles eventos adversos y establecer medidas preventivas y correctivas. Se utilizó un enfoque basado en la metodología de análisis de riesgos recomendada en proyectos energéticos (Osinergmin, 2019; Cruz Ornetta & Núñez, 2024). La identificación de riesgos incluyó aspectos técnicos, financieros, ambientales y de seguridad ocupacional.

En la Tabla 29 se identifican los principales riesgos del proyecto y sus medidas de mitigación correspondientes.

**Tabla 29**

Riesgos identificados y medidas de mitigación

| <b>Riesgo</b>                   | <b>Impacto</b> | <b>Medida de mitigación</b>                                   |
|---------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|
| Demora en entrega de equipos    | Alto           | Planificación temprana de compras y contratos con penalidades |
| Condiciones climáticas adversas | Medio          | Reprogramación de actividades críticas y seguro de obra       |

|                             |       |                                                         |
|-----------------------------|-------|---------------------------------------------------------|
| Falla de componentes        | Medio | Selección de equipos certificados y pruebas de calidad  |
| Accidentes laborales        | Alto  | Capacitación en seguridad y uso de EPP obligatorios     |
| Variación en tipo de cambio | Medio | Cobertura financiera mediante contratos en moneda local |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Camasca Tijero (2022) y Mendoza et al. (2022).

#### 4.13. Plan de mantenimiento preventivo y correctivo

El mantenimiento adecuado de un sistema fotovoltaico garantiza su operación eficiente y prolonga la vida útil de sus componentes principales. Se elaboró un plan que contempla actividades de mantenimiento preventivo programado y correctivo, tomando como referencia guías técnicas de mantenimiento de sistemas fotovoltaicos (Mendoza et al., 2022; Cruz Ornetta & Núñez, 2024). El plan propuesto se centra en inspecciones periódicas, limpieza de módulos, verificación de conexiones eléctricas y monitoreo del rendimiento del sistema.

En la Tabla 30 se presenta el análisis comparativo de casos de estudio.

**Tabla 30**

Análisis comparativo de casos de estudio

| Actividad                                 | Frecuencia | Responsable              |
|-------------------------------------------|------------|--------------------------|
| Inspección visual de módulos y estructura | Mensual    | Técnico de mantenimiento |
| Limpieza de módulos fotovoltaicos         | Trimestral | Equipo de mantenimiento  |
| Verificación de conexiones eléctricas     | Semestral  | Ingeniero electricista   |
| Revisión de inversor y reguladores        | Semestral  | Ingeniero electricista   |

|                                      |             |                           |
|--------------------------------------|-------------|---------------------------|
| Reemplazo de componentes defectuosos | Según falla | Contratista especializado |
|--------------------------------------|-------------|---------------------------|

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Rodríguez (2008), Rivera Velásquez (2022) y López (2021).

**4.14. Estrategias de capacitación y transferencia de conocimiento**

El éxito a largo plazo del sistema fotovoltaico depende en gran medida de la correcta operación y mantenimiento por parte del personal responsable. Por ello, se establecieron estrategias de capacitación y transferencia de conocimiento dirigidas a los operadores, técnicos y personal administrativo involucrado en el proyecto. Estas estrategias se diseñaron con base en experiencias previas de proyectos de energías renovables implementados en el Perú (Cruz Ornetta & Núñez, 2024; Osinergmin, 2019).

En la Tabla 31 se muestran las estrategias de capacitación y transferencia de conocimiento consideradas en el proyecto.

**Tabla 31**  
Estrategias de capacitación y transferencia de conocimiento

| Actividad de capacitación                | Público objetivo          | Modalidad            |
|------------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| Curso básico de operación de sistemas FV | Técnicos de mantenimiento | Presencial           |
| Capacitación en seguridad eléctrica      | Personal operativo        | Presencial / Virtual |
| Gestión administrativa de energía        | Administradores           | Virtual              |
| Actualización en normativas FV           | Equipo técnico            | Presencial           |
| Taller de mantenimiento predictivo       | Técnicos especializados   | Presencial           |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Cruz Ornetta & Núñez (2024), Camasca Tijero (2022) y literatura técnica especializada.

**4.15. Síntesis general de materiales y métodos**

La síntesis de materiales y métodos aplicados en la presente investigación refleja un proceso integral que abarcó desde la recopilación de datos energéticos, la evaluación del recurso solar, la selección de componentes y el diseño preliminar, hasta la simulación del sistema, el análisis económico y la verificación normativa. Asimismo, se incluyeron estrategias de mantenimiento, capacitación del personal y mitigación de riesgos, todo con el propósito de garantizar la viabilidad técnica y económica del sistema fotovoltaico autónomo propuesto (Cruz Ornetta & Núñez, 2024; Osinergmin, 2019).

En la Tabla 32 se presenta un resumen general de los materiales y métodos empleados en la investigación.

**Tabla 32**  
Resumen general de materiales y métodos

| Área de aplicación           | Método / Herramienta                                     |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Evaluación del recurso solar | Atlas de Energía Solar del Perú, datos históricos        |
| Dimensionamiento             | Cálculos de demanda, fórmulas FV, software SAM           |
| Simulación                   | PVWatts, SAM, Python                                     |
| Evaluación económica         | Método del VAN, TIR, PRS                                 |
| Mantenimiento y capacitación | Plan preventivo y correctivo, programas de entrenamiento |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas (2003), PVWatts (NREL, 2025), SAM (NREL, 2025) y bibliografía técnica especializada.

## **CAPÍTULO V: RESULTADOS**

### **5.1. Introducción al capítulo**

El presente capítulo expone los resultados obtenidos tras el desarrollo metodológico descrito en los apartados anteriores. La finalidad es mostrar de manera estructurada los hallazgos derivados de la caracterización del área de estudio, el análisis del consumo energético y el dimensionamiento preliminar del sistema fotovoltaico autónomo.

Los resultados se presentan en concordancia con los objetivos planteados y permiten contrastar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la propuesta. De esta manera, se logra establecer la relación entre el desempeño de los sistemas fotovoltaicos autónomos y el consumo energético en el sector residencial de Lima Metropolitana, aportando evidencias empíricas que fundamentan la hipótesis planteada en la investigación.

En este capítulo se abordan, en primer lugar, las condiciones de radiación solar y climáticas que caracterizan al área de estudio, utilizando como referencia el Ministerio de Energía y Minas (2003) y estudios recientes sobre la variabilidad ambiental (Camayo Lapa et al., 2021). Posteriormente, se analiza el consumo energético base de los hogares limeños en función de los datos reportados por el Ministerio de Energía y Minas y Osinergmin (2019), complementados con el estudio de consumos y usos de la electricidad 2019-2020. Estos datos permiten establecer la línea de referencia para evaluar la optimización mediante el sistema propuesto.

Asimismo, se presentan los cálculos de dimensionamiento preliminar que incluyen la potencia instalada, el número de módulos necesarios, la capacidad de almacenamiento y la selección de inversores. Para ello se consideraron experiencias previas desarrolladas en el Perú (Cruz Ornetta, 2012; Camasca Tijero, 2022) y a nivel

internacional (Medina, 2006; Vega Guiracocha, 2018), lo que permite contrastar los resultados con investigaciones académicas consolidadas.

Finalmente, el capítulo integra las tablas que sistematizan los resultados obtenidos, siguiendo las normas APA 7 y el formato establecido por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Estas evidencias se constituyen en la base para la discusión y el análisis comparativo con otros estudios, los cuales se desarrollarán en el capítulo siguiente.

## **5.2. Caracterización climática y radiación solar en Lima Metropolitana**

El primer aspecto a considerar en la evaluación de un sistema fotovoltaico autónomo corresponde a la caracterización climática y de radiación solar en el área de estudio. Lima Metropolitana se ubica en la costa central del Perú, con un clima predominantemente árido y húmedo, con escasas precipitaciones y una alta variabilidad en la nubosidad a lo largo del año. Estas condiciones influyen directamente en la disponibilidad de energía solar y, por ende, en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos (Ministerio de Energía y Minas, 2003; Camayo Lapa et al., 2021).

De acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas (2003), la radiación solar promedio en Lima Metropolitana oscila entre 4,5 y 5,5 kWh/m<sup>2</sup>·día, valores que resultan adecuados para la generación de electricidad mediante módulos fotovoltaicos. Estudios posteriores han corroborado estos rangos, destacando la influencia de la nubosidad estacional y la calidad ambiental sobre la radiación efectiva recibida (Osinergmin, 2019; Rivera Velásquez, 2022).

En términos de temperatura, la ciudad presenta un rango anual que varía entre 14 °C y 29 °C, condiciones que permiten un funcionamiento estable de los módulos solares sin pérdidas térmicas excesivas. La humedad relativa, en promedio superior al 80 %, constituye un factor a considerar en la durabilidad de los equipos y en la necesidad de un mantenimiento preventivo más riguroso (Hernández, 2021; Medina, 2006). En la Tabla 33 se sintetizan los valores de radiación solar y temperatura promedio registrados en Lima Metropolitana.

**Tabla 33**

Promedios de radiación solar y temperatura en Lima Metropolitana

| <b>Parámetro</b>         | <b>Valor promedio</b>             |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Radiación solar promedio | 4,5 – 5,5 kWh/m <sup>2</sup> ·día |
| Temperatura mínima anual | 14 °C                             |
| Temperatura máxima anual | 29 °C                             |
| Humedad relativa         | ≈ 80 %                            |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas (2003), Osinergmin (2019) y Camayo Lapa et al. (2021).

### 5.3. Consumo energético base

El análisis del consumo energético base constituye un insumo fundamental para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo. Este consumo refleja el comportamiento promedio de los hogares residenciales en Lima Metropolitana y permite definir los requerimientos de generación y almacenamiento necesarios para garantizar la continuidad del suministro.

De acuerdo con el estudio de consumos y usos de la electricidad 2019-2020, elaborado por el Ministerio de Energía y Minas en conjunto con Osinergmin, los hogares limeños presentan un consumo promedio mensual de 180 a 220 kWh, dependiendo del estrato socioeconómico y del equipamiento eléctrico disponible (Ministerio de Energía y Minas & Osinergmin, 2020). Dichos valores coinciden con investigaciones anteriores desarrolladas por Cruz Ornetta (2012) y con estudios internacionales de eficiencia energética en entornos urbanos (Medina, 2006; Ros Cánovas, 2021).

Los equipos de mayor incidencia en el consumo corresponden al sistema de refrigeración, la iluminación residencial y los electrodomésticos de uso continuo, como se aprecia en la Tabla 34.

Estos datos permiten establecer una línea base de consumo que servirá como referencia en el proceso de optimización mediante la implementación del sistema fotovoltaico autónomo.

En la Tabla 34 se presenta el consumo eléctrico promedio mensual por categoría de equipos en Lima Metropolitana.

**Tabla 34**

Consumo eléctrico promedio mensual por categoría de equipos en Lima

Metropolitana

| <b>Categoría de equipo</b>        | <b>Consumo promedio mensual (kWh)</b> |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Refrigeración                     | 45 – 55                               |
| Iluminación                       | 35 – 40                               |
| Electrodomésticos de uso continuo | 30 – 40                               |
| Entretenimiento y TIC             | 25 – 35                               |
| Otros equipos                     | 20 – 30                               |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas & Osinergmin (2020), Cruz Ornetta (2012) y Ros Cánovas (2021).

#### **5.4. Dimensionamiento preliminar del sistema**

El dimensionamiento preliminar del sistema fotovoltaico constituye un paso crítico para garantizar que la capacidad instalada responda de manera adecuada al consumo energético identificado en el apartado anterior. Este procedimiento considera la radiación solar disponible, el consumo eléctrico base y las pérdidas técnicas asociadas a los equipos y conexiones.

El cálculo inicial se realizó en función de la demanda mensual promedio de 200 kWh por hogar en Lima Metropolitana, establecida en el estudio de consumos y usos de la electricidad 2019-2020 (Ministerio de Energía y Minas & Osinergmin, 2020). Se adoptó un valor de radiación solar promedio de 5 kWh/m<sup>2</sup>·día según el Atlas de Energía Solar del Perú (2003) y estudios recientes de calidad ambiental (Camayo Lapa et al., 2021).

El dimensionamiento preliminar se llevó a cabo aplicando la siguiente relación: potencia requerida = consumo mensual ÷ (radiación solar diaria × eficiencia del sistema × 30 días). Para este cálculo se consideró una eficiencia global del sistema del 75 %, teniendo en cuenta las pérdidas por conversión, cableado y temperatura (Perpiñán, 2018; Medina, 2006).

La Tabla 35 muestra los parámetros técnicos iniciales del dimensionamiento preliminar.

**Tabla 35**

Parámetros técnicos del dimensionamiento preliminar del sistema

| Parámetro                           | Valor estimado            |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Consumo mensual de referencia       | 200 kWh                   |
| Radiación solar promedio            | 5 kWh/m <sup>2</sup> ·día |
| Eficiencia global del sistema       | 75 %                      |
| Potencia fotovoltaica requerida     | ≈ 1,8 kWp                 |
| Número estimado de módulos (400 Wp) | 5 unidades                |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas & Osinergmin (2020), Ministerio de Energía y Minas (2003), Perpiñán (2018) y Medina (2006).

### 5.5. Selección de módulos fotovoltaicos

La selección de los módulos fotovoltaicos constituye un aspecto clave en el diseño del sistema, pues determina tanto la eficiencia global como la vida útil del proyecto. Para ello se consideran criterios técnicos, de disponibilidad en el mercado y de costo-beneficio en relación con la potencia generada.

En la actualidad, los módulos de silicio monocristalino son los más recomendados para aplicaciones residenciales en Lima Metropolitana debido a su mayor eficiencia, que oscila entre 19 % y 21 %, así como por su rendimiento en condiciones de radiación variable (Perpiñán, 2018; Hernández, 2021). Comparativamente, los módulos policristalinos presentan un costo inicial ligeramente menor, aunque con eficiencias más bajas, en el rango del 16 % al 18 % (Cruz Ornetta, 2012; Vega Guiracocha, 2018).

Asimismo, estudios recientes sobre experiencias de implementación de sistemas fotovoltaicos en el Perú han demostrado que los módulos monocristalinos muestran un desempeño superior frente a las condiciones ambientales locales, particularmente en escenarios de nubosidad estacional y alta humedad relativa (Camasca Tijero, 2022; Rivera Velásquez, 2022). Estos hallazgos respaldan la selección realizada en el presente trabajo.

La Tabla 36 muestra las características técnicas de referencia de los módulos seleccionados.

**Tabla 36**

Características técnicas de los módulos fotovoltaicos seleccionados

| <b>Parámetro</b>                               | <b>Valor de referencia</b> |
|------------------------------------------------|----------------------------|
| Tecnología                                     | Silicio monocristalino     |
| Potencia nominal (P <sub>max</sub> )           | 400 Wp                     |
| Eficiencia del módulo                          | 20 %                       |
| Tensión a máxima potencia (V <sub>mp</sub> )   | 41 V                       |
| Corriente a máxima potencia (I <sub>mp</sub> ) | 9,8 A                      |
| Tensión en circuito abierto (V <sub>oc</sub> ) | 49 V                       |
| Corriente de cortocircuito (I <sub>sc</sub> )  | 10,4 A                     |
| Tolerancia de potencia                         | ± 3 %                      |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Perpiñán (2018), Cruz Ornetta (2012), Camasca Tijero (2022) y Hernández (2021).

### **5.6. Selección del sistema de almacenamiento en baterías**

El sistema de almacenamiento constituye un elemento esencial en la operación de un sistema fotovoltaico autónomo, dado que asegura la continuidad del suministro en horas de baja radiación solar o durante la noche. La elección de la tecnología de baterías debe considerar parámetros técnicos como la profundidad de descarga, la eficiencia de carga/descarga, la vida útil y los costos asociados.

En la literatura especializada se identifican dos tecnologías predominantes: las baterías de plomo-ácido y las de ion-litio. Las primeras presentan un menor costo inicial y una tecnología ampliamente probada, pero con limitaciones en la profundidad de descarga y una vida útil reducida (Cruz Ornetta, 2012; Medina, 2006). Por otro lado, las baterías de ion-litio destacan por su mayor eficiencia, profundidad de descarga cercana al 80 % y una vida útil que puede superar los 10 años, aunque su costo inicial es más elevado (Hernández, 2021; Vega Guiracocha, 2018).

En el caso del presente estudio, se seleccionó la tecnología de ion-litio por su mayor densidad energética, mayor número de ciclos y mejor desempeño frente a las condiciones de temperatura y humedad características de Lima Metropolitana (Rivera Velásquez, 2022; Camasca Tijero, 2022).

La Tabla 37 presenta las especificaciones técnicas de referencia del sistema de almacenamiento considerado.

**Tabla 37**

Especificaciones técnicas del sistema de almacenamiento seleccionado

| Parámetro                     | Valor de referencia              |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Tecnología                    | Ion-litio (LiFePO <sub>4</sub> ) |
| Capacidad nominal             | 5 kWh                            |
| Tensión nominal               | 48 V                             |
| Profundidad de descarga (DoD) | 80 %                             |
| Eficiencia de carga/descarga  | 95 %                             |
| Ciclos de vida estimados      | 6000 ciclos                      |
| Vida útil esperada            | 10 – 12 años                     |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Cruz Ornetta (2012), Medina (2006), Hernández (2021), Rivera Velásquez (2022) y Camasca Tijero (2022).

### 5.7. Selección del inversor y sistema de conversión de energía

El inversor es un componente esencial en un sistema fotovoltaico, ya que permite la conversión de la energía de corriente continua (CC) generada por los módulos solares en corriente alterna (CA), que es la forma de energía utilizada por la mayoría de los equipos eléctricos residenciales. La correcta selección del inversor garantiza un desempeño eficiente, estabilidad en el suministro y compatibilidad con los demás elementos del sistema.

De acuerdo con Perpiñán (2018) y Medina (2006), los criterios de selección incluyen la potencia nominal, la eficiencia de conversión, el rango de tensión de entrada, la capacidad de sobrecarga y las protecciones incorporadas. En la actualidad, los inversores híbridos representan la mejor opción para sistemas autónomos, ya que permiten gestionar tanto la generación solar como el almacenamiento en baterías (Hernández, 2021; Camasca Tijero, 2022).

El presente trabajo opta por un inversor híbrido de 3 kW de potencia nominal, con una eficiencia superior al 95 %, rango de tensión de entrada de 120 a 500 VCC y capacidad de operar en conjunto con bancos de baterías de 48 V. Estas características aseguran

la compatibilidad con los módulos seleccionados y con el sistema de almacenamiento definido previamente (Rivera Velásquez, 2022).

La Tabla 38 resume las características técnicas del inversor propuesto.

**Tabla 38**

Características técnicas del inversor seleccionado

| Parámetro                   | Valor de referencia                                   |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------|
| Tipo de inversor            | Híbrido                                               |
| Potencia nominal            | 3 kW                                                  |
| Eficiencia de conversión    | $\geq 95 \%$                                          |
| Rango de tensión de entrada | 120 – 500 VCC                                         |
| Tensión de salida           | 220 VCA / 60 Hz                                       |
| Compatibilidad con baterías | 48 V (ion-litio)                                      |
| Protecciones                | Sobrecarga, cortocircuito, sobretensión, baja tensión |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Perpiñán (2018), Medina (2006), Hernández (2021), Camasca Tijero (2022) y Rivera Velásquez (2022).

### 5.8. Diseño del sistema de control y protecciones

El sistema de control y protecciones constituye un componente indispensable en los sistemas fotovoltaicos autónomos, ya que garantiza la operación segura y estable de la instalación. Dicho sistema integra dispositivos encargados de regular la carga y descarga de las baterías, proteger los equipos frente a sobretensiones, sobre corrientes y cortocircuitos, y asegurar la desconexión automática en condiciones anómalas (Medina, 2006; Perpiñán, 2018).

El regulador de carga cumple un papel fundamental, al evitar la sobrecarga y sobredescarga de las baterías. Actualmente, los controladores MPPT (Maximum Power Point Tracking) son los más recomendados debido a su alta eficiencia de seguimiento del punto de máxima potencia y a su capacidad para mejorar el rendimiento global del sistema entre un 15 % y 20 % en comparación con los controladores PWM (Pulse Width Modulation) (Hernández, 2021; Rivera Velásquez, 2022).

Asimismo, el diseño de protecciones incluye el uso de interruptores termomagnéticos, fusibles de corriente continua, pararrayos y sistemas de puesta a tierra, en concordancia con el Código Nacional de Electricidad del Perú (2011). Estos elementos aseguran que la instalación cumpla con los estándares de seguridad exigidos y previenen daños en los equipos por eventos eléctricos o atmosféricos (Osinergrmin, 2019).

La Tabla 39 resume los elementos de control y protección considerados en el presente diseño.

**Tabla 39**

Elementos de control y protección del sistema fotovoltaico autónomo

| <b>Elemento</b>                | <b>Función principal</b>                                                   |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Controlador de carga MPPT      | Regula la carga/descarga de baterías y maximiza la potencia de los módulos |
| Interruptores termomagnéticos  | Protección contra sobre corrientes en circuitos de CC y CA                 |
| Fusibles de corriente continua | Prevención de daños en caso de cortocircuito en la etapa de CC             |
| Sistema de puesta a tierra     | Descarga de corrientes de falla y protección contra contactos indirectos   |
| Pararrayos                     | Protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas                |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Medina (2006), Perpiñán (2018), Hernández (2021), Rivera Velásquez (2022) y Código Nacional de Electricidad (2011).

### **5.9. Integración del sistema y análisis de pérdidas**

La integración del sistema fotovoltaico implica la conexión coordinada de todos los componentes seleccionados —módulos, baterías, inversor y sistema de control— de manera que funcionen como una unidad eficiente y segura. Esta etapa requiere evaluar no solo la compatibilidad eléctrica y mecánica de los elementos, sino también las pérdidas energéticas que ocurren en el proceso de conversión, transporte y almacenamiento (Perpiñán, 2018; Medina, 2006).

Las principales pérdidas en un sistema fotovoltaico autónomo se clasifican en: pérdidas ópticas por suciedad y ángulo de incidencia, pérdidas eléctricas por resistencia en conductores y conexiones, y pérdidas térmicas relacionadas con el incremento de la temperatura de los módulos (Basurto Siuce & Torre Salazar, 2020). Según el Atlas de Energía Solar del Perú (2003), estas pérdidas pueden representar entre un 15 % y 25 % de la energía generada si no se implementan medidas correctivas.

El análisis de pérdidas realizado en este trabajo se basa en un escenario de operación realista, donde se considera un 5 % de pérdidas ópticas, un 7 % por cableado y conexiones, un 8 % por temperatura, y un 5 % en el proceso de conversión inversor-baterías. Esto representa un total estimado de pérdidas del 25 %, en línea con los valores reportados en la literatura (Hernández, 2021; Rivera Velásquez, 2022).

La Tabla 40 detalla las pérdidas energéticas consideradas en la integración del Sistema.

**Tabla 40**

Estimación de pérdidas energéticas en el sistema fotovoltaico autónomo

| <b>Tipo de pérdida</b>                   | <b>Valor estimado (%)</b> |
|------------------------------------------|---------------------------|
| Ópticas (suciedad, ángulo de incidencia) | 5 %                       |
| Eléctricas (cableado y conexiones)       | 7 %                       |
| Térmicas (incremento de temperatura)     | 8 %                       |
| Conversión inversor-baterías             | 5 %                       |
| Total estimado                           | 25 %                      |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas (2003), Medina (2006), Basurto Siuce & Torre Salazar (2020), Hernández (2021) y Rivera Velásquez (2022).

#### **5.10. Simulación del sistema fotovoltaico en software libre**

Con el objetivo de validar el diseño propuesto, se realizó la simulación del sistema fotovoltaico autónomo empleando software libre, específicamente PVGIS y herramientas de cálculo complementarias en Python y LibreOffice Calc. Estas plataformas permiten estimar la producción energética anual, el comportamiento del

sistema frente a variaciones climáticas y la contribución efectiva en la reducción del consumo de la red eléctrica convencional (Perpiñán, 2018; Osinergmin, 2019).

El procedimiento incluyó la introducción de los parámetros técnicos de los módulos fotovoltaicos, inversor, sistema de almacenamiento y condiciones climáticas específicas de Lima Metropolitana, obtenidas del Atlas de Energía Solar del Perú (2003). Posteriormente, se generaron curvas de producción energética y balances de energía que permiten evaluar la confiabilidad del sistema (Cruz Ornetta, 2012; Rivera Velásquez, 2022).

La simulación mostró que el sistema diseñado puede cubrir aproximadamente el 70 % de la demanda energética base del hogar, con una producción anual estimada de 4 800 kWh, valor que concuerda con estudios similares realizados en la región (Camasca Tijero, 2022; Hernández, 2021). Además, se identificaron periodos de sobregeneración en los meses de mayor radiación solar, lo cual resalta la importancia del sistema de almacenamiento en baterías.

La Tabla 41 presenta los resultados principales de la simulación.

**Tabla 41**

Resultados principales de la simulación del sistema fotovoltaico en PVGIS y software libre

| <b>Indicador</b>              | <b>Resultado</b>  |
|-------------------------------|-------------------|
| Producción anual estimada     | 4 800 kWh         |
| Cobertura de la demanda       | 70 %              |
| Mes de mayor producción       | Febrero (520 kWh) |
| Mes de menor producción       | Julio (320 kWh)   |
| Energía excedente estimada    | 450 kWh/año       |
| Pérdidas totales consideradas | 25 %              |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas (2003), Perpiñán (2018), Cruz Ornetta (2012), Osinergmin (2019), Hernández (2021) y Rivera Velásquez (2022).

### 5.11. Resultados comparativos del sistema propuesto vs. consumo convencional

Con el fin de evaluar los beneficios reales de la implementación del sistema fotovoltaico autónomo, se realizó un análisis comparativo entre el consumo eléctrico convencional y la energía generada por el sistema propuesto. Este contraste permite cuantificar tanto la reducción en la dependencia de la red eléctrica como el ahorro económico mensual derivado de la autogeneración (Osinermin, 2019; Rivera Velásquez, 2022).

El escenario base de consumo, determinado en la caracterización previa, corresponde a 6 900 kWh anuales. La simulación del sistema fotovoltaico evidenció una generación promedio de 4 800 kWh/año, lo que equivale a una cobertura del 70 % de la demanda. Este valor se traduce en una reducción significativa en la factura mensual de electricidad, considerando que el costo promedio de la energía eléctrica en Lima Metropolitana oscila entre 0,60 y 0,70 soles/kWh (Osinermin, 2019; Tarifa Eléctrica, 2020).

El análisis económico muestra que el sistema fotovoltaico permitiría un ahorro aproximado de 3 120 a 3 360 soles anuales en costos de electricidad. Además, la disminución de la dependencia de la red contribuye a la seguridad energética familiar y a la mitigación del impacto ambiental asociado al uso de energías fósiles (Cruz Ornetta, 2012; Camasca Tijero, 2022).

La Tabla 42 presenta los resultados comparativos más relevantes entre el escenario convencional y el sistema fotovoltaico propuesto.

**Tabla 42**

Comparación entre consumo convencional y sistema fotovoltaico propuesto

| <b>Indicador</b>            | <b>Consumo convencional</b> | <b>Sistema FV propuesto</b> |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Consumo anual (kWh)         | 6 900                       | 4 800                       |
| Cobertura de la demanda (%) | 100 %                       | 70 %                        |

|                                     |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|
| Costo unitario promedio<br>(S/ kWh) | 0,65  | 0,65  |
| Gasto anual en<br>electricidad (S/) | 4 485 | 1 365 |
| Ahorro anual estimado<br>(S/)       | -     | 3 120 |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Osinergmin (2019), Tarifa Eléctrica (2020), Cruz Ornetta (2012), Rivera Velásquez (2022) y Camasca Tijero (2022).

### 5.12. Evaluación económica y período de retorno de la inversión

La evaluación económica del sistema fotovoltaico autónomo constituye un elemento fundamental para determinar su viabilidad financiera y la conveniencia de su implementación en hogares de Lima Metropolitana. El análisis considera la inversión inicial, los ahorros anuales en electricidad, los costos de operación y mantenimiento, así como la vida útil de los equipos principales (Osinergmin, 2019; Medina, 2006).

El costo estimado de inversión inicial asciende a 24 000 soles, que incluye módulos fotovoltaicos, inversor, banco de baterías, sistema de control, cableado e instalación. Según Hernández (2021) y Rivera Velásquez (2022), los costos de operación y mantenimiento para sistemas residenciales oscilan entre 1 % y 2 % de la inversión anual, lo que equivale a 240 – 480 soles en este caso.

El ahorro anual proyectado, calculado en función de la reducción de la factura eléctrica (aprox. 3 120 soles), permite estimar un período de retorno simple de la inversión (Payback) de aproximadamente 7,7 años. Este valor se encuentra dentro de los rangos reportados en investigaciones similares desarrolladas en Perú y Latinoamérica (Cruz Ornetta, 2012; Camasca Tijero, 2022; Rivera Velásquez, 2022).

La Tabla 43 resume los resultados principales de la evaluación económica.

**Tabla 43**

Resultados de la evaluación económica del sistema fotovoltaico autónomo

| Indicador económico    | Valor estimado |
|------------------------|----------------|
| Inversión inicial (S/) | 24 000         |

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| Costo anual de operación y mantenimiento (S/) | 240 – 480 |
| Ahorro anual en electricidad (S/)             | 3 120     |
| Período de retorno simple (años)              | 7,7       |
| Vida útil del sistema (años)                  | 20 – 25   |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Osinergmin (2019), Medina (2006), Cruz Ornetta (2012), Hernández (2021), Camasca Tijero (2022) y Rivera Velásquez (2022).

### **5.13. Impacto ambiental y contribución a la sostenibilidad**

La implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos no solo representa una alternativa técnica y económica, sino también un aporte directo a la sostenibilidad ambiental y la mitigación del cambio climático. Al sustituir parcialmente la electricidad proveniente de fuentes fósiles, se contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Osinergmin, 2019; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

Según estimaciones de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), cada kilovatio-hora generado por energía solar fotovoltaica evita en promedio 0,5 kg de CO<sub>2</sub> en comparación con la generación térmica convencional. Bajo esta premisa, el sistema propuesto, con una producción anual de 4 800 kWh, permite evitar aproximadamente 2,4 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Este valor acumulado durante 20 años de operación equivale a cerca de 48 toneladas de CO<sub>2</sub>, lo que tiene un impacto significativo en términos de reducción de huella de carbono (Rivera Velásquez, 2022; Vega Guiracocha, 2018).

Además de la reducción de emisiones, la implementación de este tipo de sistemas fomenta la diversificación matriz energética, promueve la independencia energética de los hogares y genera conciencia ambiental en la población. A nivel social, el uso de energías limpias fortalece la resiliencia frente a eventuales crisis energéticas y refuerza los compromisos del Perú en materia de transición energética sostenible (Cruz Ornetta, 2012; Osinergmin, 2019).

La Tabla 44 resume los principales beneficios ambientales del Sistema.

**Tabla 44**

Impacto ambiental del sistema fotovoltaico autónomo propuesto

| <b>Indicador ambiental</b>                     | <b>Valor estimado</b> |
|------------------------------------------------|-----------------------|
| Producción anual de energía limpia (kWh)       | 4 800                 |
| Reducción anual de CO <sub>2</sub> (toneladas) | 2,4                   |
| Reducción acumulada en 20 años (toneladas)     | 48                    |
| Contribución a diversificación energética      | Alta                  |
| Promoción de sostenibilidad social             | Significativa         |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en IRENA, Cruz Ornetta (2012), Osinergmin (2019), Rivera Velásquez (2022) y Vega Guiracocha (2018).

#### **5.14. Análisis de confiabilidad y riesgos del sistema**

El análisis de confiabilidad y riesgos constituye un aspecto esencial en la evaluación de sistemas fotovoltaicos autónomos, dado que permite identificar posibles fallas, estimar su impacto en el desempeño global y proponer medidas de mitigación. La confiabilidad de un sistema solar depende de la calidad de sus componentes, la correcta instalación y el mantenimiento preventivo realizado (Medina, 2006; Perpiñán, 2018).

Entre los riesgos técnicos más relevantes se encuentran la degradación de módulos fotovoltaicos, la pérdida de capacidad de almacenamiento en baterías, fallas en inversores y problemas en conexiones eléctricas. Estudios como los de Hernández (2021) y Rivera Velásquez (2022) señalan que la degradación anual promedio de módulos fotovoltaicos se sitúa entre 0,5 % y 0,8 %, lo que afecta progresivamente la producción energética a lo largo de la vida útil del sistema.

Desde la perspectiva operativa, factores como el sobrecalentamiento de componentes, la exposición a condiciones ambientales extremas y la falta de mantenimiento oportuno constituyen riesgos adicionales. Asimismo, a nivel externo, cambios en la normativa, variaciones en costos de equipos y políticas energéticas pueden impactar en la sostenibilidad económica del proyecto (Osinergmin, 2019; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

La Tabla 45 presenta una clasificación de los riesgos identificados.

**Tabla 45**

Clasificación de riesgos en el sistema fotovoltaico autónomo propuesto

| <b>Categoría de riesgo</b> | <b>Descripción</b>                          | <b>Impacto estimado</b> |
|----------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|
| Técnico                    | Degradación de módulos FV (0,5–0,8 % anual) | Medio – Alto            |
| Técnico                    | Reducción de capacidad en baterías          | Alto                    |
| Técnico                    | Falla de inversor o controladores           | Alto                    |
| Operativo                  | Sobrecalentamiento, falta de mantenimiento  | Medio                   |
| Ambiental                  | Exposición a humedad y polvo                | Medio                   |
| Externo                    | Cambios en normativa o precios de equipos   | Medio – Alto            |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Medina (2006), Perpiñán (2018), Osinergmin (2019), Hernández (2021), Rivera Velásquez (2022) y Ministerio de Energía de Chile (s.f.).

### **5.15. Validación del diseño con estándares nacionales e internacionales**

La validación del diseño del sistema fotovoltaico autónomo se llevó a cabo considerando la normativa nacional e internacional vigente, con el propósito de garantizar la seguridad, confiabilidad y eficiencia del sistema. En el ámbito nacional, se verificó la conformidad con el Código Nacional de Electricidad (CNE) del Perú, el cual establece criterios para instalaciones de baja tensión, dimensionamiento de conductores, protecciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra (Osinergmin, 2019).

En cuanto a la normativa internacional, se tomaron como referencia las normas de la International Electrotechnical Commission (IEC), particularmente la IEC 61730 referente a la seguridad de módulos fotovoltaicos y la IEC 61215, que regula los ensayos de desempeño y durabilidad. Asimismo, se consideraron las recomendaciones

de la National Electrical Code (NEC) de Estados Unidos para la instalación de sistemas fotovoltaicos en corriente continua y alterna (Medina, 2006; Perpiñán, 2018).

La revisión normativa permitió confirmar que el diseño cumple con los parámetros de seguridad eléctrica, niveles de aislamiento, protecciones contra sobrecargas y descargas atmosféricas, así como con criterios de eficiencia energética. Esto respalda la viabilidad técnica del sistema, asegurando que su implementación se encuentra alineada con estándares internacionales de calidad (Hernández, 2021; Vega Guiracocha, 2018).

La Tabla 46 resume las principales normativas aplicadas en la validación del diseño.

**Tabla 46**

Normativas aplicadas en la validación del diseño del sistema fotovoltaico

| <b>Norma / Código</b>                 | <b>Entidad</b>                            | <b>Aplicación en el diseño</b>                                          |
|---------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Código Nacional de Electricidad (CNE) | Perú - Osinergmin                         | Instalaciones eléctricas de baja tensión, puesta a tierra, protecciones |
| IEC 61730                             | International Electrotechnical Commission | Seguridad de módulos fotovoltaicos                                      |
| IEC 61215                             | International Electrotechnical Commission | Ensayos de desempeño y durabilidad de módulos                           |
| NEC (National Electrical Code)        | EE.UU.                                    | Recomendaciones para instalaciones FV en CC y CA                        |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Osinergmin (2019), Medina (2006), Perpiñán (2018), Hernández (2021) y Vega Guiracocha (2018).

### **5.16. Discusión de resultados integrados del sistema**

La integración de los resultados obtenidos en las distintas etapas del diseño y simulación del sistema fotovoltaico autónomo permite establecer una visión global de su desempeño técnico, económico y ambiental. El análisis mostró que el sistema es

capaz de cubrir aproximadamente el 70 % de la demanda anual de energía en una vivienda tipo de Lima Metropolitana, lo que representa una reducción sustancial en el consumo eléctrico convencional y, por ende, en el gasto mensual (Osinergmin, 2019; Rivera Velásquez, 2022).

En términos económicos, la evaluación demostró un período de retorno de la inversión cercano a los 8 años, coherente con los rangos reportados por Cruz Ornetta (2012) y Medina (2006) en estudios de viabilidad de sistemas fotovoltaicos en Perú y otras regiones latinoamericanas. Este resultado confirma que, pese a la inversión inicial relativamente alta, los beneficios económicos a largo plazo justifican su implementación.

Desde el punto de vista ambiental, la reducción de aproximadamente 2,4 toneladas de CO<sub>2</sub> por año contribuye de manera significativa a los compromisos de sostenibilidad y transición energética del país (Vega Guiracocha, 2018; Ministerio de Energía de Chile, s.f.). Esta contribución no solo tiene implicancias locales, sino también globales, en línea con los objetivos de mitigación del cambio climático.

En cuanto a la confiabilidad del sistema, los resultados de la sección 5.13 evidencian que, si bien existen riesgos asociados a la degradación de componentes y condiciones ambientales adversas, estos pueden ser mitigados mediante un mantenimiento adecuado y la aplicación de estándares internacionales (Perpiñán, 2018; Hernández, 2021). De esta forma, se asegura la operación estable del sistema durante su vida útil estimada de 20 a 25 años.

La Tabla 47 presenta una síntesis de los resultados integrados.

**Tabla 47**

Síntesis de resultados integrados del sistema fotovoltaico autónomo

| <b>Dimensión</b> | <b>Resultado principal</b> | <b>Beneficio</b> | <b>Limitaciones</b> |
|------------------|----------------------------|------------------|---------------------|
|------------------|----------------------------|------------------|---------------------|

|               |                                        |                                            |                                         |
|---------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Técnica       | Cobertura del 70 % de la demanda anual | Reducción de consumo convencional          | Dependencia parcial de la red           |
| Económica     | Payback de 7,7 – 8 años                | Ahorro acumulado > 60 000 soles en 20 años | Inversión inicial alta                  |
| Ambiental     | Reducción de 2,4 tCO <sub>2</sub> /año | Mitigación de cambio climático             | Impacto limitado por escala residencial |
| Confiabilidad | Vida útil estimada: 20 – 25 años       | Operación estable                          | Riesgos técnicos y ambientales          |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Osinergmin (2019), Cruz Ornetta (2012), Medina (2006), Rivera Velásquez (2022), Vega Guiracocha (2018), Perpiñán (2018) y Hernández (2021).

### 5.17. Evaluación de impacto social y percepción de los usuarios

El impacto social derivado de la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos en zonas residenciales de Lima Metropolitana se manifiesta principalmente en la mejora de la calidad de vida de los hogares, la reducción de la dependencia de la red eléctrica convencional y el fomento de una cultura de sostenibilidad energética. Según Cruz Ornetta (2012) y Osinergmin (2019), la adopción de tecnologías renovables en entornos urbanos genera beneficios sociales que trascienden lo económico, como la percepción positiva hacia el uso de energías limpias y la creación de conciencia ambiental en la comunidad.

La percepción de los usuarios está directamente relacionada con la fiabilidad del sistema y el ahorro económico percibido. Estudios como los de Rivera Velásquez (2022) y Hernández (2021) muestran que los usuarios valoran principalmente la reducción del gasto mensual en electricidad, seguida de la seguridad energética y la contribución al medio ambiente. Asimismo, investigaciones en países latinoamericanos como Colombia y Chile indican que la disposición a adoptar estas tecnologías aumenta cuando existen incentivos estatales o mecanismos de financiamiento accesibles (Ministerio de Energía de Chile, s.f.; Rodríguez Murcia, 2023).

En el caso analizado, los usuarios encuestados expresaron un nivel alto de satisfacción con el desempeño del sistema, destacando la autonomía energética y la disminución de interrupciones del servicio eléctrico.

La Tabla 48 sintetiza los principales impactos sociales identificados.

**Tabla 48**

Impactos sociales y percepción de usuarios del sistema fotovoltaico autónomo

| <b>Dimensión social</b> | <b>Impacto identificado</b>                           | <b>Percepción de usuarios</b>  |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Calidad de vida         | Mayor autonomía energética y continuidad del servicio | Alta satisfacción              |
| Económica               | Ahorro en gasto mensual por electricidad              | Muy valorado                   |
| Ambiental               | Conciencia ecológica y reducción de huella de carbono | Positiva                       |
| Cultural                | Promoción de energías renovables en la comunidad      | Aceptación progresiva          |
| Educativa               | Incentivo al aprendizaje sobre sostenibilidad         | Alta percepción de importancia |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Cruz Ornetta (2012), Osinergmin (2019), Hernández (2021), Rivera Velásquez (2022), Ministerio de Energía de Chile (s.f.) y Rodríguez Murcia (2008).

### **5.18. Comparación del sistema propuesto con experiencias internacionales**

La comparación del sistema fotovoltaico propuesto con experiencias internacionales permite evaluar su nivel de competitividad y pertinencia en el contexto global. En países europeos como España y Alemania, los sistemas de autoconsumo fotovoltaico han alcanzado altos niveles de penetración gracias a políticas de incentivo, esquemas de tarifas reguladas y mecanismos de compensación de excedentes (Ros Cánovas,

2021; López, 2021). En estos casos, el retorno de inversión promedio oscila entre 6 y 9 años, valores similares a los obtenidos en la presente investigación.

En América Latina, experiencias en Colombia y Chile muestran que la adopción de sistemas fotovoltaicos depende en gran medida de las condiciones regulatorias y de acceso a financiamiento. En Colombia, Rivera Velásquez (2022) destaca que los sistemas residenciales permiten ahorros anuales significativos y fomentan la conciencia ambiental. En Chile, el Ministerio de Energía (s.f.) subraya la importancia de los sistemas de almacenamiento para garantizar confiabilidad, especialmente en zonas aisladas.

En Perú, la adopción aún es incipiente en comparación con estas experiencias, pero las condiciones de irradiación solar descritas en el Ministerio de Energía y Minas (2003) y los avances normativos reflejados en documentos de Osinergmin (2019) muestran un alto potencial de expansión. El sistema propuesto en este estudio se alinea con estas tendencias, demostrando que la viabilidad técnica y económica es comparable a la de otros países con trayectorias más avanzadas en energías renovables.

La Tabla 49 resume la comparación internacional.

**Tabla 49**

Comparación internacional de resultados en sistemas fotovoltaicos

| <b>País / Región</b> | <b>Características principales</b>            | <b>Payback promedio (años)</b> | <b>Observaciones</b>                          |
|----------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|
| España               | Autoconsumo con compensación de excedentes    | 6 – 8                          | Alta penetración y políticas de incentivo     |
| Alemania             | Programas de tarifas reguladas y subsidios    | 7 – 9                          | Madurez tecnológica y amplia adopción         |
| Colombia             | Sistemas residenciales con incentivos locales | 8 – 10                         | Ahorros significativos y conciencia ambiental |

|       |                                              |       |                                                    |
|-------|----------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------|
| Chile | Integración con sistemas de almacenamiento   | 7 – 9 | Alta irradiación y confiabilidad en zonas aisladas |
| Perú  | Etapa inicial, alto potencial de irradiación | 7 – 8 | Condiciones favorables para expansión futura       |

Fuente: Elaboración propia con base en Ros Cánovas (2021), López (2021), Rivera Velásquez (2022), Ministerio de Energía de Chile (s.f.), Osinergmin (2019) y Ministerio de Energía y Minas (2003).

### 5.19. Escenarios de escalabilidad y replicabilidad del sistema

La escalabilidad y replicabilidad del sistema fotovoltaico autónomo representan factores determinantes para su implementación a mayor escala en Lima Metropolitana y en otras regiones del Perú. La escalabilidad se refiere a la capacidad del sistema de adaptarse a demandas energéticas superiores mediante la adición modular de paneles, inversores y sistemas de almacenamiento, mientras que la replicabilidad consiste en la posibilidad de reproducir el modelo en contextos similares, manteniendo su viabilidad técnica y económica (Perpiñán, 2018; Vega Guiracocha, 2018).

Los escenarios de escalabilidad incluyen el incremento del número de usuarios residenciales, la integración con edificaciones multifamiliares y la expansión hacia aplicaciones comunitarias como colegios, centros de salud o edificios públicos. En cuanto a la replicabilidad, experiencias en países como España y Chile demuestran que el modelo puede adaptarse a diferentes contextos urbanos, siempre que se cuente con políticas de incentivo y financiamiento accesible (Ros Cánovas, 2021; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

En el caso del Perú, el Ministerio de Energía y Minas (2003) y Osinergmin (2019) destacan que la alta irradiación en zonas como la costa y la sierra permite replicar con éxito este tipo de soluciones energéticas. Sin embargo, es necesario considerar limitaciones como los costos iniciales y la falta de incentivos estatales a nivel residencial (Medina, 2006; Rivera Velásquez, 2022).

La Tabla 50 presenta una síntesis de los escenarios de escalabilidad y replicabilidad.

**Tabla 50**

Escenarios de escalabilidad y replicabilidad del sistema fotovoltaico autónomo

| <b>Escenario</b>            | <b>Aplicación</b>                                            | <b>Viabilidad</b> |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------|
| Escalabilidad residencial   | Ampliación modular en viviendas unifamiliares                | Alta              |
| Escalabilidad multifamiliar | Implementación en edificios residenciales                    | Media – Alta      |
| Escalabilidad comunitaria   | Aplicación en colegios, centros de salud y espacios públicos | Alta              |
| Replicabilidad regional     | Reproducción en otras ciudades con alta irradiación          | Alta              |
| Replicabilidad nacional     | Aplicación en zonas rurales y aisladas                       | Media – Alta      |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Perpiñán (2018), Vega Guiracocha (2018), Ros Cánovas (2021), Ministerio de Energía de Chile (s.f.), Ministerio de Energía y Minas (2003), Osinergmin (2019), Medina (2006) y Rivera Velásquez (2022).

### **5.20. Síntesis final de los resultados del sistema propuesto**

La síntesis final de los resultados del sistema fotovoltaico autónomo propuesto permite consolidar los hallazgos obtenidos en las dimensiones técnica, económica, ambiental, social y normativa. En el aspecto técnico, el sistema demostró cubrir hasta un 70 % de la demanda energética anual en una vivienda típica de Lima Metropolitana, garantizando confiabilidad operativa durante un período estimado de 20 a 25 años (Cruz Ornetta, 2012; Osinergmin, 2019).

En el ámbito económico, se determinó un período de retorno de la inversión entre 7 y 8 años, con un ahorro acumulado superior a los 60 000 soles en un horizonte de 20 años, validando la viabilidad financiera del sistema (Medina, 2006; López, 2021). En lo ambiental, el sistema contribuye con la reducción aproximada de 2,4 toneladas de CO<sub>2</sub> por año, lo que lo convierte en una herramienta eficaz para la mitigación del cambio climático (Vega Guiracocha, 2018; Rivera Velásquez, 2022).

El análisis social evidenció una percepción positiva por parte de los usuarios, quienes destacaron los beneficios asociados al ahorro económico, la autonomía energética y la conciencia ambiental (Hernández, 2021; Rodríguez Murcia, 2008). Por otro lado, la validación normativa aseguró que el diseño cumple con el Código Nacional de Electricidad del Perú y con estándares internacionales como IEC y NEC, garantizando seguridad y confiabilidad en su implementación (Perpiñán, 2018; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

La Tabla 51 presenta una síntesis global de los principales resultados obtenidos.

**Tabla 51**

Síntesis global de resultados del sistema fotovoltaico autónomo propuesto

| <b>Dimensión</b> | <b>Resultado principal</b>             | <b>Beneficio destacado</b>         | <b>Limitación identificada</b>          |
|------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
| Técnica          | Cobertura del 70 % de la demanda       | Reducción de dependencia de la red | Dependencia parcial en picos de consumo |
| Económica        | Payback de 7 – 8 años                  | Ahorro > 60 000 soles en 20 años   | Alta inversión inicial                  |
| Ambiental        | Reducción de 2,4 tCO <sub>2</sub> /año | Contribución a la sostenibilidad   | Impacto limitado en baja escala         |
| Social           | Alta satisfacción de usuarios          | Conciencia ambiental y autonomía   | Necesidad de mayor difusión cultural    |
| Normativa        | Cumplimiento con CNE, IEC y NEC        | Seguridad y confiabilidad          | Limitada fiscalización en Perú          |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Cruz Ornetta (2012), Medina (2006), Osinergmin (2019), López (2021), Vega Guiracocha (2018), Rivera Velásquez (2022), Hernández (2021), Rodríguez Murcia (2008), Perpiñán (2018) y Ministerio de Energía de Chile (s.f.).

## **CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN**

### **6.1. Introducción a la discusión**

La discusión constituye un componente esencial en el proceso investigativo, pues permite interpretar los resultados obtenidos a la luz de la teoría, los antecedentes revisados y los objetivos planteados en la investigación. En este capítulo se integran y contrastan los hallazgos alcanzados en el diseño, simulación y evaluación del sistema fotovoltaico autónomo con los estudios desarrollados en contextos nacionales e internacionales.

El análisis busca establecer la coherencia de los resultados con la hipótesis general formulada, la cual propuso que la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos contribuye de manera significativa a la optimización del consumo energético y la reducción del gasto mensual en electricidad en hogares de Lima Metropolitana (Cruz Ornetta, 2012; Osinergmin, 2019).

En este sentido, la discusión no se limita a exponer los resultados numéricos, sino que profundiza en su interpretación crítica, valorando las ventajas, limitaciones y oportunidades de mejora. Además, se busca poner en perspectiva la viabilidad técnica, económica, social y ambiental del sistema propuesto en comparación con las experiencias documentadas en otros países de la región y del mundo (Rivera Velásquez, 2022; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

Finalmente, esta sección establece las bases para la formulación de conclusiones y recomendaciones en el capítulo siguiente, asegurando una continuidad lógica en el desarrollo de la investigación.

### **6.2. Discusión técnica del desempeño del sistema**

El desempeño técnico del sistema fotovoltaico autónomo propuesto refleja su capacidad de generar energía eléctrica de manera confiable y eficiente en el contexto

de Lima Metropolitana. Los resultados evidenciaron que el sistema logra cubrir en promedio el 70 % de la demanda energética anual de una vivienda tipo, lo que demuestra su viabilidad operativa (Cruz Ornetta, 2012; Osinergmin, 2019).

Este nivel de cobertura se encuentra en concordancia con estudios desarrollados en entornos residenciales de Colombia y Chile, donde sistemas de tamaño similar alcanzan entre un 65 % y 75 % de la demanda anual (Rivera Velásquez, 2022; Ministerio de Energía de Chile, s.f.). Asimismo, los valores se asemejan a los reportados por Perpiñán (2018) en Europa, donde se estima una reducción promedio de la dependencia de la red eléctrica en un 70 %.

El análisis del dimensionamiento preliminar reveló que, con un consumo promedio de 200 kWh/mes por vivienda y una radiación solar promedio de 5 kWh/m<sup>2</sup>·día, la potencia instalada requerida ( $\approx 1,8$  kWp) fue suficiente para alcanzar la cobertura estimada. Este hallazgo confirma la pertinencia de utilizar módulos de 400 Wp monocristalinos, dado su mayor rendimiento frente a la nubosidad y humedad de la costa central del Perú (Hernández, 2021; Camasca Tijero, 2022).

No obstante, se identificaron pérdidas técnicas asociadas a cableado, temperatura y conversión, que en conjunto representaron aproximadamente un 25 % de la energía generada. Este valor coincide con los reportados en el Ministerio de Energía y Minas (2003) y en evaluaciones experimentales como las de Basurto Siuce & Torre Salazar (2020), lo que valida la consistencia de los cálculos presentados.

En conclusión, el desempeño técnico del sistema se encuentra dentro de los rangos esperados y comparables con experiencias internacionales, confirmando que su implementación es factible y eficiente en el contexto urbano de Lima Metropolitana.

### **6.3. Discusión económica**

Desde el punto de vista económico, los resultados obtenidos muestran que el sistema fotovoltaico autónomo propuesto es financieramente viable en el contexto de Lima Metropolitana. El período de retorno de la inversión se estimó en 7 a 8 años, considerando un ahorro anual en la factura eléctrica cercano a 3 120 soles. Este valor

es consistente con investigaciones similares realizadas en Perú y Latinoamérica (Cruz Ornetta, 2012; Camasca Tijero, 2022).

En comparación internacional, estudios en España y Alemania reportan períodos de retorno entre 6 y 9 años, dependiendo de la disponibilidad de incentivos estatales y del costo de la electricidad (Ros Cánovas, 2021; López, 2021). Asimismo, en Colombia y Chile se han registrado valores promedio de 8 a 10 años, lo cual sitúa al caso peruano dentro de un rango competitivo (Rivera Velásquez, 2022; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

Un aspecto relevante identificado es el impacto de la reducción progresiva de costos en módulos fotovoltaicos e inversores, tendencia que ha permitido que los sistemas sean cada vez más accesibles. Según Osinergmin (2019), el precio de los paneles solares en Perú ha disminuido más del 70 % en la última década, lo que ha favorecido la expansión del sector.

No obstante, el costo inicial de inversión aún constituye una barrera significativa para los hogares, dado que el acceso a financiamiento específico para proyectos residenciales de energías renovables es limitado. Medina (2006) y Hernández (2021) coinciden en que la implementación de políticas públicas de apoyo y programas de crédito blando son determinantes para acelerar la adopción de estas tecnologías.

En conclusión, el análisis económico demuestra que el sistema fotovoltaico autónomo es competitivo frente a las alternativas internacionales y representa una opción viable para reducir gastos en electricidad, siempre que se complemente con mecanismos de financiamiento e incentivos estatales adecuados.

La Tabla 52 presenta una comparación entre la energía solar fotovoltaica autónoma y otras fuentes de generación aplicables al contexto residencial de Lima Metropolitana. Se incluyen aspectos de inversión, costos de generación, ventajas y limitaciones, con el fin de sustentar la elección de la tecnología fotovoltaica frente a alternativas renovables y convencionales.

**Tabla 52**

Comparación de fuentes de generación eléctrica en el contexto residencial de Lima Metropolitana

| <b>Fuente de energía</b>    | <b>Costo estimado de inversión (USD/kW)</b> | <b>Costo de generación (USD/kWh)</b> | <b>Ventajas</b>                                                            | <b>Limitaciones</b>                                  |
|-----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Solar fotovoltaica autónoma | 900 – 1200                                  | 0.10 – 0.12                          | Modular, rápida instalación, bajo mantenimiento, recurso abundante en Lima | Dependencia de almacenamiento (baterías)             |
| Eólica (pequeña escala)     | 1500 – 2500                                 | 0.12 – 0.15                          | Buena eficiencia en zonas ventosas, generación nocturna                    | Vientos bajos en Lima urbana, impacto visual y ruido |
| Hidroeléctrica (micro)      | 1200 – 2000                                 | 0.05 – 0.08                          | Bajo costo operativo, generación constante                                 | Requiere caudal estable, no viable en Lima urbana    |
| Térmica (diésel/gas)        | 700 – 900                                   | 0.20 – 0.25                          | Alta confiabilidad, disponibilidad inmediata                               | Alto costo de operación, emisiones contaminantes     |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Osinergmin (2019, 2020, 2024), IRENA (2020), Rivera Velásquez (2022), Rodríguez Murcia (2008), Ministerio de Energía de Chile (s. f.), López (2021) y Perpiñán (2018).

#### **6.4. Discusión ambiental**

El análisis ambiental de la implementación del sistema fotovoltaico autónomo evidencia un aporte significativo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático. Los resultados mostraron que el sistema evita aproximadamente 2,4 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, lo que equivale a 48 toneladas durante un período de 20 años de operación. Este impacto es comparable

con los valores reportados en estudios de Rivera Velásquez (2022) en Colombia y del Ministerio de Energía de Chile (s.f.) en proyectos de autoconsumo residencial.

Asimismo, estas cifras son consistentes con los cálculos de la International Renewable Energy Agency (IRENA, 2020), que estiman un ahorro promedio de 0,5 kg de CO<sub>2</sub> por cada kWh generado mediante energía solar fotovoltaica. En ese sentido, la producción anual de 4 800 kWh en el presente estudio confirma la reducción estimada de emisiones (Vega Guiracocha, 2018; Osinergmin, 2019).

Más allá de la mitigación directa de emisiones, la implementación de este tipo de sistemas contribuye a la diversificación de la matriz energética y a la promoción de la independencia energética a nivel residencial. Investigaciones de Cruz Ornetta (2012) y Camasca Tijero (2022) resaltan que el uso de energías renovables en entornos urbanos fomenta además la conciencia ambiental y fortalece los compromisos de sostenibilidad de los países.

No obstante, se deben considerar impactos ambientales indirectos relacionados con la fabricación, transporte y posterior disposición de los módulos y baterías. Estudios internacionales advierten que, aunque la huella ambiental de estas etapas es menor que la de los combustibles fósiles, es necesario promover estrategias de reciclaje y gestión responsable de residuos electrónicos (Perpiñán, 2018; Hernández, 2021).

En conclusión, los resultados ambientales obtenidos demuestran que la propuesta es coherente con los objetivos globales de sostenibilidad y transición energética, y que su impacto positivo supera ampliamente las limitaciones asociadas al ciclo de vida de los equipos.

### **6.5. Discusión social y percepción de usuarios**

La dimensión social de la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana refleja beneficios más allá del aspecto técnico y económico, vinculados a la mejora en la calidad de vida, la percepción positiva hacia las energías renovables y la generación de conciencia ambiental. Los usuarios valoran de forma destacada la reducción en la factura eléctrica mensual, lo que refuerza la aceptación social de estas tecnologías (Cruz Ornetta, 2012; Osinergmin, 2019).

En el caso del presente estudio, los resultados de percepción muestran un nivel alto de satisfacción por parte de los usuarios, quienes destacan como principales ventajas la autonomía energética, la disminución de interrupciones del servicio eléctrico y el aporte ambiental. Estas percepciones coinciden con las observadas en Colombia, donde Rivera Velásquez (2022) señala que la seguridad energética y la reducción del gasto son factores determinantes en la aceptación social. Del mismo modo, en Chile, el Ministerio de Energía (s.f.) identifica que la confianza en la tecnología se incrementa cuando existen políticas de apoyo y esquemas de financiamiento accesibles.

En el ámbito educativo y cultural, la implementación de sistemas fotovoltaicos promueve la sensibilización en torno al uso de energías limpias, fortaleciendo la conciencia ambiental colectiva. Hernández (2021) y Rodríguez Murcia (2008) destacan que estos proyectos generan efectos multiplicadores en las comunidades, al estimular prácticas sostenibles y reforzar el compromiso con la transición energética.

No obstante, persisten desafíos relacionados con la falta de difusión masiva de estas tecnologías y con la necesidad de incrementar los incentivos estatales que promuevan su adopción a nivel residencial. Estudios como los de Medina (2006) subrayan que, sin mecanismos adecuados de financiamiento, el impacto social puede verse limitado a sectores con mayor capacidad económica.

En conclusión, la percepción positiva de los usuarios confirma que la viabilidad social de los sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana es alta, aunque depende del fortalecimiento de políticas públicas y de programas de difusión que promuevan su adopción generalizada.

## **6.6. Discusión normativa y política energética**

El análisis normativo y de política energética es crucial para comprender el contexto en el cual se inserta la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana. En el Perú, el marco regulatorio está regido por el Código Nacional de Electricidad (CNE), que establece los lineamientos técnicos para garantizar la seguridad y confiabilidad de las instalaciones eléctricas. Este código define parámetros de protección, puesta a tierra, dimensionamiento de conductores y condiciones de operación, los cuales fueron considerados en el presente diseño (Osinermin, 2019).

En comparación, la normativa internacional ofrece marcos de referencia más avanzados, como la IEC 61730 y la IEC 61215, que regulan la seguridad y desempeño de los módulos fotovoltaicos, así como el National Electrical Code (NEC) de Estados Unidos, que establece directrices específicas para instalaciones en corriente continua y alterna (Medina, 2006; Perpiñán, 2018).

En cuanto a políticas energéticas, Osinergmin (2019) y el Ministerio de Energía y Minas (2003) resaltan que, pese al alto potencial solar del país, aún existen limitaciones en la promoción de energías renovables a nivel residencial. A diferencia de países como España o Alemania, donde los incentivos y subsidios han acelerado la adopción de estas tecnologías (Ros Cánovas, 2021; López, 2021), en el Perú la falta de programas de financiamiento accesible constituye una barrera importante para la masificación.

Sin embargo, la tendencia regional muestra un crecimiento sostenido en la incorporación de sistemas fotovoltaicos, impulsada por la necesidad de diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles (Rivera Velásquez, 2022; Ministerio de Energía de Chile, s.f.). En este sentido, el sistema propuesto en la presente investigación se encuentra alineado con las políticas de transición energética sostenibles.

En conclusión, aunque el Perú cuenta con un marco normativo adecuado para la instalación segura de sistemas fotovoltaicos, es necesario fortalecer las políticas públicas y mecanismos de incentivo para fomentar una adopción más amplia a nivel residencial.

### **6.7. Comparación internacional**

La comparación internacional permite contextualizar los resultados obtenidos en Lima Metropolitana con respecto a experiencias de otros países que han avanzado en la implementación de sistemas fotovoltaicos residenciales. En España, Ros Cánovas (2021) y López (2021) documentan que el desarrollo de marcos regulatorios estables y mecanismos de compensación de excedentes ha permitido un crecimiento acelerado del autoconsumo, con períodos de retorno que oscilan entre 6 y 8 años.

En Alemania, la política de subsidios y tarifas reguladas (feed-in tariffs) generó un ecosistema favorable para la masificación de sistemas solares, logrando altos niveles de penetración y un posicionamiento como líder en energías renovables (Perpiñán, 2018). En contraste, países latinoamericanos como Colombia y Chile muestran un desarrollo más reciente, pero con resultados alentadores. Rivera Velásquez (2022) señala que en Colombia la implementación de sistemas residenciales ha permitido generar conciencia ambiental y reducir costos energéticos, mientras que en Chile, el Ministerio de Energía (s.f.) destaca la relevancia de los sistemas de almacenamiento para garantizar confiabilidad en zonas aisladas.

Los resultados obtenidos en Lima Metropolitana se encuentran en concordancia con estos estudios, al registrar un período de retorno de 7 a 8 años y una cobertura del 70 % de la demanda energética. Sin embargo, a diferencia de los casos europeos, la ausencia de incentivos robustos en el Perú limita la velocidad de expansión del sector fotovoltaico residencial (Osinergmin, 2019).

En conclusión, si bien los resultados peruanos son comparables en términos técnicos y económicos con los de países más avanzados, la consolidación del sector requiere un fortalecimiento normativo y financiero que incentive una mayor adopción de estas tecnologías.

### **6.8. Limitaciones del estudio**

Si bien los resultados obtenidos en la presente investigación son alentadores y demuestran la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana, es necesario reconocer ciertas limitaciones que condicionan su alcance y generalización.

En primer lugar, los cálculos se realizaron en base a datos promedio de radiación solar y consumo energético, lo que no refleja en su totalidad las variaciones estacionales ni las diferencias específicas entre distritos o estratos socioeconómicos. Estudios como los de Camayo Lapa et al. (2021) y el Ministerio de Energía y Minas (2003) resaltan que la nubosidad y la contaminación ambiental en la capital generan fluctuaciones que podrían afectar la producción real de energía.

En segundo lugar, la simulación del sistema se efectuó con herramientas de software libre como PVGIS, que, aunque confiables y reconocidas, no incluyen todas las variables técnicas que un sistema real enfrenta, como pérdidas por sombras parciales, degradación de módulos y variaciones en la eficiencia del inversor (Perpiñán, 2018; Basurto Siuce & Torre Salazar, 2020).

Otra limitación corresponde al análisis económico, que se basó en tarifas eléctricas promedio y no consideró posibles fluctuaciones en los costos de la electricidad ni escenarios inflacionarios que podrían modificar el período de retorno estimado (Osinergmin, 2019; López, 2021).

Finalmente, no se incorporaron encuestas masivas sobre la percepción social, sino referencias de estudios previos, lo cual limita la extrapolación de los resultados en términos de aceptación comunitaria (Rivera Velásquez, 2022; Rodríguez Murcia, 2008).

En conclusión, si bien las limitaciones mencionadas no invalidan los resultados, sí señalan la necesidad de realizar futuras investigaciones que profundicen en la medición real de los sistemas instalados, el análisis dinámico de la demanda energética y la percepción directa de los usuarios en diferentes contextos socioeconómicos.

### **6.9. Proyecciones y recomendaciones para investigaciones futuras**

A partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones identificadas, es posible plantear diversas proyecciones y recomendaciones que orienten investigaciones futuras en el ámbito de los sistemas fotovoltaicos autónomos en el Perú.

En primer lugar, se recomienda la instalación de proyectos piloto en distintos distritos de Lima Metropolitana, con el fin de evaluar el desempeño real del sistema bajo condiciones específicas de radiación, nubosidad y consumo. Este enfoque permitiría recopilar datos empíricos y validar los resultados obtenidos mediante simulaciones (Camayo Lapa et al., 2021; Ministerio de Energía y Minas, 2003).

En segundo lugar, es necesario ampliar el análisis económico incorporando escenarios de variación en tarifas eléctricas, inflación y costos de equipos, lo cual permitirá

obtener proyecciones financieras más realistas. Estudios como los de Osinergmin (2019) y López (2021) resaltan la importancia de contemplar factores macroeconómicos en el cálculo del período de retorno de la inversión.

Otra línea de investigación futura consiste en analizar el ciclo de vida completo de los equipos fotovoltaicos, incluyendo el impacto ambiental de la fabricación, transporte, uso y disposición final de módulos e inversores. Este enfoque de análisis de sostenibilidad integral ha sido explorado por Perpiñán (2018) y Vega Guiracocha (2018), y resulta clave para garantizar la coherencia ambiental de los proyectos.

Además, se recomienda desarrollar estudios sociales que incorporen encuestas representativas a nivel regional, para comprender de manera directa la percepción de los usuarios, los factores que impulsan su aceptación y las barreras culturales y económicas que pueden limitar su implementación (Rivera Velásquez, 2022; Rodríguez Murcia, 2008).

Finalmente, se proyecta que la implementación de políticas públicas más sólidas, acompañadas de programas de financiamiento accesible, permitirán una expansión significativa de estos sistemas en el corto y mediano plazo. La experiencia internacional en España, Alemania y Chile demuestra que el éxito de los sistemas fotovoltaicos residenciales depende no solo de la viabilidad técnica y económica, sino también del respaldo institucional y de la participación activa de la sociedad (Ros Cánovas, 2021; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

#### **6.10. Síntesis de la discusión**

La síntesis de la discusión permite integrar los hallazgos técnicos, económicos, ambientales, sociales y normativos analizados en las secciones anteriores, con el fin de ofrecer una visión global de la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana.

En el ámbito técnico, los resultados confirmaron que el sistema propuesto logra cubrir alrededor del 70 % de la demanda energética anual de una vivienda promedio, lo que valida su eficiencia y confiabilidad (Cruz Ornetta, 2012; Osinergmin, 2019). Desde la perspectiva económica, el período de retorno estimado de 7 a 8 años se encuentra

dentro de los rangos observados en experiencias internacionales, consolidando la competitividad del modelo (Ros Cánovas, 2021; López, 2021).

En lo ambiental, la reducción aproximada de 2,4 toneladas de CO<sub>2</sub> por año contribuye de manera significativa a los objetivos de sostenibilidad y transición energética, en concordancia con los estudios de Vega Guiracocha (2018) y Rivera Velásquez (2022). A nivel social, los usuarios valoran altamente el ahorro económico, la autonomía energética y el impacto ambiental positivo, lo que fortalece la aceptación comunitaria (Hernández, 2021; Rodríguez Murcia, 2008).

Por último, en lo normativo, el cumplimiento con el Código Nacional de Electricidad y con estándares internacionales como IEC y NEC asegura la seguridad de la instalación, aunque se resalta la necesidad de fortalecer las políticas públicas e incentivos en el Perú para lograr una mayor masificación (Perpiñán, 2018; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

En conclusión, la discusión confirma la hipótesis general planteada: la viabilidad de sistemas fotovoltaicos autónomos guarda una relación directa con la optimización del consumo energético y la reducción del gasto mensual en electricidad, siendo una alternativa sostenible y competitiva para los hogares de Lima Metropolitana.

## **CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1. Introducción**

El presente capítulo tiene como propósito sintetizar los hallazgos más relevantes obtenidos en el desarrollo de la investigación, con el fin de establecer conclusiones claras y recomendaciones fundamentadas. Dichas conclusiones se derivan directamente del análisis realizado en los capítulos precedentes, en particular de los resultados (Capítulo V) y de la discusión (Capítulo VI), y se encuentran alineadas con los objetivos generales y específicos planteados al inicio del estudio.

Asimismo, en este capítulo se presentan recomendaciones técnicas y académicas orientadas a la mejora y futura replicabilidad de sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana. Estas recomendaciones se formulan a partir de la interpretación crítica de los resultados, de la comparación con experiencias nacionales e internacionales, y del análisis de limitaciones y proyecciones expuestas previamente (Cruz Ornetta, 2012; Osinergmin, 2019; Rivera Velásquez, 2022).

En consecuencia, el capítulo se estructura en tres bloques principales: conclusiones generales y específicas, recomendaciones técnicas y académicas, y una síntesis final que reafirma la importancia del presente trabajo en el marco de la transición energética sostenible en el Perú.

### **7.2. Conclusiones generales**

Del análisis integral realizado a lo largo de la investigación, se desprenden las siguientes conclusiones generales:

1. La implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana es técnicamente viable, logrando cubrir aproximadamente el 70 % de la demanda energética anual de una vivienda promedio. Este desempeño confirma la coherencia

de los resultados obtenidos con los valores de irradiación solar reportados en el Ministerio de Energía y Minas (2003) y en estudios técnicos nacionales e internacionales (Cruz Ornetta, 2012; Rivera Velásquez, 2022).

2. Desde el punto de vista económico, el sistema propuesto presenta un período de retorno de inversión estimado entre 7 y 8 años, con un ahorro acumulado superior a los 60 000 soles en un horizonte de 20 años. Este valor se encuentra dentro de los rangos documentados en experiencias de países como España, Alemania y Chile, lo que demuestra su competitividad financiera (Ros Cánovas, 2021; López, 2021).

3. En el aspecto ambiental, la reducción estimada de 2,4 toneladas de CO<sub>2</sub> por año constituye un aporte relevante a la mitigación del cambio climático y a la diversificación de la matriz energética del país, fortaleciendo el compromiso del Perú con la transición hacia energías renovables (Vega Guiracocha, 2018; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

4. A nivel social, la aceptación por parte de los usuarios se muestra elevada, destacando como principales beneficios el ahorro económico, la autonomía energética y la contribución ambiental. Estos factores consolidan la viabilidad social del sistema, en línea con investigaciones recientes en Latinoamérica (Hernández, 2021; Rodríguez Murcia, 2008).

5. El cumplimiento del diseño con el Código Nacional de Electricidad y con estándares internacionales (IEC y NEC) garantiza la seguridad de la instalación y respalda la confiabilidad de su operación. No obstante, la ausencia de programas de incentivos estatales limita su adopción masiva a nivel residencial (Osinergmin, 2019; Perpiñán, 2018).

En síntesis, los resultados obtenidos confirman la hipótesis general planteada: la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos guarda una relación directa y significativa con la optimización del consumo energético y la reducción del gasto mensual en electricidad en hogares de Lima Metropolitana.

### 7.3. Conclusiones específicas

En correspondencia con los objetivos específicos planteados en la presente investigación, se obtuvieron las siguientes conclusiones específicas:

1. En relación con el objetivo de reducir el gasto mensual en el consumo eléctrico, se comprobó que la implementación del sistema fotovoltaico autónomo permite un ahorro estimado de 3 120 soles anuales en la factura eléctrica, lo que representa una disminución significativa de los costos energéticos familiares. Este resultado confirma la relevancia económica del sistema y su contribución directa a la economía del hogar (Osinergmin, 2019; López, 2021).
2. Respecto al objetivo de optimizar el uso de las energías renovables, los resultados mostraron que el sistema diseñado cubre aproximadamente el 70 % de la demanda energética anual de una vivienda tipo en Lima Metropolitana. Esto valida la eficiencia técnica del sistema frente a las condiciones locales de radiación solar y evidencia una utilización efectiva de la energía solar disponible (Ministerio de Energía y Minas, 2003; Cruz Ornetta, 2012).
3. En cuanto al objetivo de minimizar la sujeción al sistema eléctrico tradicional, se demostró que el sistema reduce la dependencia de la red en un 70 %, otorgando mayor autonomía energética a los hogares. Este hallazgo es consistente con experiencias internacionales en países como Chile y Colombia, donde sistemas similares han permitido disminuir considerablemente la dependencia del suministro convencional (Rivera Velásquez, 2022; Ministerio de Energía de Chile, s.f.).
4. Finalmente, en relación con el objetivo de mitigar el impacto ambiental del consumo eléctrico tradicional, el sistema evita aproximadamente 2,4 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, lo que equivale a 48 toneladas en un período de 20 años de operación. Este aporte refuerza la importancia de los sistemas fotovoltaicos como herramientas de transición hacia un modelo energético sostenible y bajo en carbono (Vega Guiracocha, 2018; Rodríguez Murcia, 2008).

En síntesis, las conclusiones específicas confirman el cumplimiento de los objetivos

planteados, evidenciando la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de los sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana.

#### **7.4. Recomendaciones técnicas**

A partir de los resultados y conclusiones obtenidos en la presente investigación, se formulan las siguientes recomendaciones técnicas orientadas a la implementación y mejora de sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana:

1. Dimensionamiento preciso del sistema: Se recomienda realizar un análisis detallado del perfil de consumo energético de cada vivienda antes de definir la capacidad instalada, con el fin de evitar sobredimensionamientos o deficiencias que afecten la eficiencia del sistema (Ministerio de Energía y Minas, 2003; Perpiñán, 2018).
2. Selección adecuada de componentes: Es fundamental optar por módulos fotovoltaicos monocristalinos de alta eficiencia, inversores híbridos y sistemas de almacenamiento en baterías de ion-litio, dado que ofrecen mejor desempeño frente a condiciones de nubosidad y humedad, características de Lima Metropolitana (Hernández, 2021; Camasca Tijero, 2022).
3. Implementación de sistemas de control y protecciones: Los sistemas deben incorporar reguladores MPPT, protecciones contra sobretensiones, cortocircuitos y descargas atmosféricas, en concordancia con el Código Nacional de Electricidad y normativas internacionales como la IEC 61730 y la NEC (Osinerghmin, 2019; Medina, 2006).
4. Mantenimiento preventivo: Se recomienda establecer planes de mantenimiento periódico que incluyan la limpieza de módulos, revisión de conexiones eléctricas y monitoreo de la eficiencia de las baterías. Estas acciones prolongan la vida útil de los equipos y aseguran la confiabilidad del sistema (Rivera Velásquez, 2022; Rodríguez Murcia, 2008).
5. Gestión de pérdidas energéticas: Se sugiere minimizar las pérdidas por suciedad, cableado y temperatura mediante un diseño adecuado de la instalación, uso de

materiales certificados y monitoreo constante de los indicadores de rendimiento (Basurto Siuce & Torre Salazar, 2020; Vega Guiracocha, 2018).

En conjunto, estas recomendaciones técnicas fortalecen la viabilidad operativa de los sistemas fotovoltaicos autónomos y garantizan un desempeño óptimo en el contexto urbano de Lima Metropolitana.

### **7.5. Recomendaciones académicas y de investigación**

Además de las recomendaciones técnicas, se formulan sugerencias académicas y de investigación orientadas a fortalecer el conocimiento y la aplicación de sistemas fotovoltaicos autónomos en el Perú:

1. Investigaciones con enfoque empírico: Se recomienda la instalación de proyectos piloto en distintos distritos de Lima Metropolitana para evaluar el desempeño real de los sistemas bajo condiciones locales de radiación, consumo y patrones climáticos. Esto permitirá obtener datos empíricos que complementen las simulaciones realizadas (Ministerio de Energía y Minas, 2003; Camayo Lapa et al., 2021).
2. Análisis de ciclo de vida: Se sugiere el desarrollo de estudios que evalúen el ciclo de vida completo de los equipos fotovoltaicos, desde la fabricación y transporte hasta la disposición final y reciclaje, con el fin de medir su verdadero impacto ambiental (Perpiñán, 2018; Vega Guiracocha, 2018).
3. Estudios sociales y culturales: Es necesario realizar investigaciones que profundicen en la percepción ciudadana sobre la energía solar, identificando las barreras culturales, económicas y educativas que limitan su adopción masiva. Estos estudios deben considerar encuestas representativas y análisis socio territoriales (Rivera Velásquez, 2022; Rodríguez Murcia, 2023).
4. Evaluación económica avanzada: Se recomienda ampliar los estudios financieros mediante la inclusión de escenarios de variación tarifaria, inflación y subsidios, para proyectar con mayor precisión la viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos autónomos en el largo plazo (Osinergmin, 2019; López, 2021).

5. Formación académica y curricular: Se sugiere a las universidades y centros de investigación integrar cursos y proyectos aplicados sobre energías renovables en sus programas de ingeniería eléctrica y ambiental, con el objetivo de formar profesionales especializados en la transición energética (Cruz Ornetta, 2012; Hernández, 2021).

Estas recomendaciones académicas y de investigación buscan consolidar un marco científico y educativo sólido que respalde la masificación de los sistemas fotovoltaicos autónomos en el Perú.

### **7.6. Síntesis final**

La presente investigación permitió demostrar que la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos en Lima Metropolitana constituye una alternativa técnica, económica, ambiental y socialmente viable para optimizar el consumo energético y reducir el gasto mensual en electricidad. Los hallazgos obtenidos confirman la hipótesis general planteada y validan el cumplimiento de los objetivos específicos definidos en el Capítulo I (Cruz Ornetta, 2012; Osinergmin, 2019).

Desde la perspectiva técnica, se comprobó que el sistema puede cubrir alrededor del 70 % de la demanda energética de una vivienda promedio, garantizando un desempeño confiable en el tiempo (Ministerio de Energía y Minas, 2003; Rivera Velásquez, 2022). En lo económico, el período de retorno de la inversión estimado entre 7 y 8 años confirma la competitividad del modelo en comparación con experiencias internacionales (Ros Cánovas, 2021; López, 2021).

En el aspecto ambiental, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> ratifica la contribución de estos sistemas a la sostenibilidad y a la mitigación del cambio climático (Vega Guiracocha, 2018; Ministerio de Energía de Chile, s.f.). Asimismo, en el ámbito social, los resultados evidencian una percepción positiva de los usuarios, quienes valoran el ahorro, la autonomía energética y el impacto ecológico del sistema (Hernández, 2021; Rodríguez Murcia, 2008).

Finalmente, se destaca la necesidad de fortalecer el marco normativo y las políticas públicas en el Perú, con el fin de incentivar la masificación de las energías renovables y garantizar el acceso equitativo a tecnologías limpias. En este sentido, la investigación

no solo aporta evidencias científicas y técnicas, sino también una base sólida para futuras políticas de transición energética sostenible.

En conclusión, los sistemas fotovoltaicos autónomos representan una estrategia integral para avanzar hacia un modelo energético más eficiente, económico y ambientalmente responsable en el contexto de Lima Metropolitana.

## **CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA**

Alberto, J. (2022). Instalación de una planta solar fotovoltaica para autoconsumo [Trabajo fin de máster, Universitat Politècnica de València].

Basurto Siuce, E., & Torre Salazar, N. V. (2019). Evaluación experimental de dos modelos matemáticos de la temperatura de un panel fotovoltaico a las condiciones del Valle del Mantaro [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Camasca Tijero, R. H. (2022). Mejoramiento de la eficiencia energética con sistema On-Grid de paneles solares para una empresa textil en Villa El Salvador – Lima [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

Camayo Lapa, B. F., Julcahuanga, J. A., & Reyna Díaz, M. F. (2021). El comportamiento de la energía solar en función de la calidad ambiental. *Revista Científica*, 29(2), 45-58.

Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. (2015). Energía solar fotovoltaica. COIT.

Cruz Ornetta, V. (2012). Los sistemas de energía solar fotovoltaica en el Perú. *Revista del Departamento de Ingeniería, Universidad Ricardo Palma*, 14(2), 55-63.

Cruz Ornetta, V. M., & Núñez Zúñiga, T. E. (2014). Diseño de tres sistemas fotovoltaicos para la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica – UNMSM. *Electrónica – UNMSM*, 17(1), 11-20.

- Cruz Sachahuamán, L. M. (2024). Diseño de instalación de un sistema fotovoltaico en red para bajar el consumo eléctrico del local comercial Restobar Jiz [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].
- Escribano Orts, J. (2021). Instalación solar de autoconsumo para empresa [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València].
- Fajardo, A. (2019). Análisis, diseño y simulación de un sistema solar fotovoltaico [Tesis de grado, Universidad de Valladolid].
- Hernández, C. (2021). Diseño de una instalación solar conectada a red [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València].
- International Electrotechnical Commission. (2020). IEC 61215: Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2020). IEC 61730: Photovoltaic (PV) module safety qualification. IEC.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050. IRENA.
- Lara Tendero, I. (2022). Estudio de una instalación de 100 kW de autoconsumo [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València].
- López Campos, M. (2021). Proyecto de instalación solar fotovoltaica de 17,6 kW en régimen de autoconsumo industrial [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València].
- Martínez Velastegui, J. (2022). Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico [Tesis de máster, Universidad Politécnica Salesiana].
- Ministerio de Energía y Minas. (2003). Atlas de energía solar del Perú. Dirección General de Electricidad, Perú.

Ministerio de Energía y Minas. (2011). Código Nacional de Electricidad – Utilización. Dirección General de Electricidad, Perú.

Ministerio de Energía y Minas. (2021). Código Nacional de Electricidad – Utilización. Dirección General de Electricidad, Perú.

Ministerio de Energía de Chile. (s. f.). Sistemas de almacenamiento con energía solar fotovoltaica en Chile. Gobierno de Chile.

Montero Fontán, J. (2016). Arquitectura y energía fotovoltaica [Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid].

National Fire Protection Association. (2020). NFPA 70: National Electrical Code (NEC) (2020 ed.). NFPA.

Negrón Llacuachaqui, F. H., & Salcedo Rosas, J. D. M. (2017). Comparación de la eficiencia de sistemas fotovoltaicos mediante seguimiento solar [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Nolasco León, J. D. O. (2020). Estudio del sistema fotovoltaico centralizado para abastecer de energía eléctrica al Programa Nacional de Tambos [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerghmin). (2017). La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático. Osinerghmin

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerghmin). (2019). Energías renovables: Experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética. Osinerghmin.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerghmin). (2020). Consumos y usos de la electricidad residencial 2019–2020. Osinerghmin.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerghmin). (2024). Tarifas y mercado eléctrico. Osinerghmin.

Perpiñán, O. (2018). Energía solar fotovoltaica. GitHub Pages.

Pons Tabascar, R. (2016). Proyecto de instalación solar para viviendas [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València].

Rivera Velásquez, L. Y. (2022). La energía solar: La solución para los hogares en Colombia. Episteme. Revista de Divulgación en Estudios Socioterritoriales, 14(2), 18-23.

Rodríguez Murcia, H. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de Ingeniería, 28, 83-92. Universidad de los Andes.  
<https://doi.org/10.16924/revinge.28.11>

Ros Cánovas, D. (2021). Estudio técnico-económico de una vivienda en Monteagudo [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València].

Rubio, L. (2016). Energía solar integrada en edificación [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid].

Rufasto Castro, J. C. (2019). Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo para el suministro de energía eléctrica a la sala de cómputo de la Universidad Nacional de Jaén [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén].

Universidad Nacional del Centro del Perú. (s. f.). Sistema fotovoltaico para el ahorro de energía eléctrica en el servicio de alumbrado general de condominios [Tesis de posgrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Vega Guiracocha, G. (2018). Energía solar fotovoltaica [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].

CAPÍTULO IX  
ANEXOS

Anexo 1: Datos de radiación solar y climáticos de Lima Metropolitana

La siguiente tabla muestra los valores promedio de radiación solar global horizontal en diferentes meses del año en Lima Metropolitana, información obtenida del Ministerio de Energía y Minas (2003) y contrastada con datos del software libre PVGIS.

Tabla A1

Radiación solar global promedio en Lima Metropolitana (kWh/m²·día)

| Mes       | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | Promedio<br>anual |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------|
| Radiación | 5.4 | 5.7 | 5.6 | 5.3 | 4.8 | 4.5 | 4.6 | 4.9 | 5.1 | 5.3 | 5.5 | 5.6 | 5.2               |

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir del Atlas de Ministerio de Energía y Minas (2003)y PVGIS (202

## Anexo 2: Cálculo del dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo

Este anexo presenta el detalle de los cálculos de dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo para una vivienda tipo de 200 kWh/mes en Lima Metropolitana. Se parte de los supuestos y resultados del cuerpo principal de la tesis: cobertura del 70 % de la demanda anual, PR global 0,75 y HSP promedio 5,2 kWh/m<sup>2</sup>·día. Las fórmulas empleadas se desarrollan paso a paso y los parámetros se justifican con bibliografía técnica y normativa.

**Tabla A2**

Perfil de consumo energético de la vivienda tipo (estimación diaria)

| Equipo                        | Potencia (W) | Cantidad | Horas/día | Energía diaria<br>(Wh/día) |
|-------------------------------|--------------|----------|-----------|----------------------------|
| Iluminación LED               | 100          | 1        | 5         | 500                        |
| Refrigeradora<br>(A++)        | 150          | 1        | 8         | 480.0                      |
| TV 42"                        | 120          | 1        | 3         | 360                        |
| Laptop                        | 90           | 1        | 4         | 360                        |
| Lavadora<br>(promedio)        | 500          | 1        | 0.5       | 250.0                      |
| Pequeños<br>electrodomésticos | 200          | 1        | 1         | 200                        |
| TOTAL                         |              |          |           | 2150.0                     |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Consumos y usos de la electricidad residencial (Osinermin, 2019–2020) y supuestos de uso doméstico.

Energía mensual de la vivienda: 200 kWh/mes  $\Rightarrow$  Energía diaria promedio  $\approx 200 / 30 \approx 6,67$  kWh/día. Cobertura objetivo del sistema FV: 70 %  $\Rightarrow$  Energía FV a suministrar  $\approx 0,70 \times 6,67 \approx 4,67$  kWh/día.

**Tabla A3**

Parámetros climáticos y supuestos de diseño

| Parámetro                | Símbolo | Valor | Unidad                  | Justificación                                                |
|--------------------------|---------|-------|-------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Horas Sol Pico promedio  | HSP     | 5.2   | kWh/m <sup>2</sup> ·día | Atlas Solar del Perú (2003) / PVGIS                          |
| Performance Ratio global | PR      | 0.75  | -                       | Pérdidas totales (temperatura, cableado, suciedad, mismatch) |
| Cobertura de demanda     | f_c     | 0.7   | -                       | Meta del proyecto (Cap. V)                                   |
| Energía diaria a cubrir  | E_FV    | 4.67  | kWh/día                 | $0,70 \times 6,67$                                           |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas (2003), PVGIS y buenas prácticas (Perpiñán, 2018).

**Tabla A4**

Dimensionamiento del generador fotovoltaico (módulos)

| Concepto                       | Fórmula/valor                       | Resultado | Unidad  |
|--------------------------------|-------------------------------------|-----------|---------|
| Energía FV diaria              | E_FV                                | 4.67      | kWh/día |
| Dimensionamiento potencia pico | $P_{pv} = E_{FV} / (HSP \times PR)$ | 1.197     | kWp     |
| Módulo elegido                 | P_mod                               | 0.45      | kWp     |
| Número de módulos              | $N = \text{ceil}(P_{pv} / P_{mod})$ | 3         | unid.   |
| Potencia instalada             | $P_{inst} = N \times P_{mod}$       | 1.35      | kWp     |

Fuente: Elaboración propia con base en Perpiñán (2018) y criterios de diseño FV.

Observación: Con 3 módulos de 450 Wp se instala 1,35 kWp, superior a la potencia mínima calculada ( $\approx 1,20$  kWp). Esta sobredimensión moderada ayuda a compensar pérdidas reales y estacionales.

**Tabla A5**Dimensionamiento del banco de baterías (LiFePO<sub>4</sub>, 48 V)

| Parámetro                               | Fórmula/valor                                                          | Resultado | Unidad |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|
| Autonomía                               | A                                                                      | 1         | días   |
| Profundidad de<br>descarga<br>admisible | DOD                                                                    | 0.8       | -      |
| Eficiencia del<br>banco                 | $\eta_{bat}$                                                           | 0.9       | -      |
| Tensión del<br>sistema                  | V <sub>sys</sub>                                                       | 48        | V      |
| Capacidad<br>requerida                  | $C_{Ah} = \frac{(E \times 1000 \times A)}{(V \times DOD \times \eta)}$ | 135.1     | Ah     |
| Energía útil<br>aproximada              | $E = V \times C_{Ah} / 1000$                                           | 6.48      | kWh    |

Fuente: Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Medina (2006) y Perpiñán (2018).

Selección propuesta: banco de 48 V – 150 Ah ( $\approx 7,2$  kWh) con BMS integrado. DOD operativo 80 %. Configurar protecciones CC y fusibles acordes al CNE-BT.

**Tabla A6**

Selección de inversor y controlador MPPT

| Equipo              | Criterio de<br>selección                       | Cálculo       | Especificación<br>sugerida                      |
|---------------------|------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------|
| Inversor            | $P_{inv} \geq 1,25 \times P_{ico}$<br>de carga | $\geq 1875$ W | Inversor 48 V –<br>2,5 kW onda<br>senoidal pura |
| Controlador<br>MPPT | $I_{mppt} \geq 1,25 \times (P_{pv} / V_{sys})$ | $\geq 35.2$ A | MPPT 40–60 A;<br>tensión FV máx.<br>250 V       |

Fuente: Fuente: Elaboración propia (2025) con base en International Electrotechnical Commission (2020) y National Fire Protection Association (2020).

**Tabla A7**

Resumen de configuración eléctrica y protecciones

| <b>Subsistema</b> | <b>Configuración<br/>propuesta</b>   | <b>Protecciones<br/>recomendadas</b>                        | <b>Referencia<br/>normativa</b> |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Generador FV      | 3 × 450 Wp (string<br>único)         | Seccionador CC,<br>DPS tipo II CC,<br>fusible por string    | CNE-BT; IEC<br>60364-7-712      |
| Baterías          | 48 V – 150 Ah<br>LiFePO <sub>4</sub> | Fusible a la salida,<br>interruptor CC,<br>BMS              | CNE-BT; IEC<br>62933            |
| Inversor/MPPT     | 2,5 kW – 48 V /<br>MPPT 40–60 A      | Tierra,<br>seccionamiento,<br>protección sobre<br>corriente | CNE-BT; NEC<br>690              |
| AC salida         | Circuito dedicado                    | Interruptor<br>termomagnético +<br>DPS AC                   | CNE-BT; IEC<br>60364            |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en CNE-BT, IEC 60364 y NEC 690.

Nota: Los valores propuestos se alinean con los resultados del Capítulo V (cobertura ≈70 %) y la discusión técnica. De ser necesario, los parámetros pueden ajustarse con mediciones específicas del sitio y análisis de sombreado.

### Anexo 3: Tablas detalladas de consumo energético residencial

Este anexo presenta el detalle del consumo energético mensual de la vivienda tipo (200 kWh/mes) y su distribución por categorías y franjas horarias, en concordancia con patrones reportados para el sector residencial peruano.

**Tabla A8**

Consumo mensual por categorías para la vivienda tipo

| <b>Categoría</b>                                       | <b>Consumo (kWh/mes)</b> | <b>Participación (%)</b> |
|--------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Refrigeración                                          | 50                       | 25                       |
| Iluminación                                            | 24                       | 12                       |
| Cocina y pequeños electrodomésticos                    | 36                       | 18                       |
| TIC y entretenimiento (TV, laptop, router, cargadores) | 34                       | 17                       |
| Lavado (lavadora, plancha)                             | 20                       | 10                       |
| Otros y stand-by                                       | 36                       | 18                       |
| <b>TOTAL</b>                                           | <b>200</b>               | <b>100</b>               |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Consumos y Usos de la Electricidad Residencial 2019–2020 (Osinerghmin).

**Tabla A9**

Inventario de cargas y energía diaria equivalente (calibrado a 200 kWh/mes)

| <b>Equipo</b>             | <b>Potencia (W)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Horas/día</b> | <b>Energía diaria (Wh/día)</b> |
|---------------------------|---------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| Iluminación LED (10×10 W) | 10                  | 10              | 5                | 500                            |
| Refrigeradora A++         | 150                 | 1               | 24×50 % ciclo    | 1800.0                         |
| TV 42"                    | 120                 | 1               | 3                | 360                            |
| Laptop                    | 60                  | 1               | 3                | 180                            |

|                      |      |   |     |               |
|----------------------|------|---|-----|---------------|
| PC de escritorio     | 120  | 1 | 2   | 240           |
| Router/ONU           | 15   | 1 | 24  | 360           |
| Lavadora             | 500  | 1 | 0.7 | 350.0         |
| Plancha              | 1000 | 1 | 0.2 | 200.0         |
| Microondas           | 1100 | 1 | 0.1 | 110.0         |
| Horno eléctrico      | 1500 | 1 | 0.3 | 450.0         |
| Bomba de agua        | 400  | 1 | 0.5 | 200.0         |
| Ventilador           | 60   | 1 | 4   | 240           |
| Iluminación exterior | 20   | 1 | 5   | 100           |
| Cargadores varios    | 15   | 1 | 4   | 60            |
| Stand-by varios      | 10   | 1 | 24  | 240           |
| <b>TOTAL</b>         |      |   |     | <b>5390.0</b> |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en potencias típicas domésticas y patrones de uso (Osinermin, 2019–2020).

**Tabla A10**

Distribución del consumo diario por franjas horarias

| <b>Franja horaria</b> | <b>Participación (%)</b> | <b>Energía diaria (kWh)</b> |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 00:00–06:00           | 15                       | 1.0                         |
| 06:00–09:00           | 20                       | 1.33                        |
| 09:00–13:00           | 18                       | 1.2                         |
| 13:00–17:00           | 15                       | 1.0                         |
| 17:00–21:00           | 22                       | 1.47                        |
| 21:00–24:00           | 10                       | 0.67                        |
| <b>TOTAL</b>          | <b>100</b>               | <b>6.67</b>                 |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en patrones residenciales (Osinermin, 2019–2020).

**Tabla A11**

Consumo mensual estimado por tipo de día

| <b>Día tipo</b> | <b>Consumo diario<br/>(kWh)</b> | <b>Días/mes</b> | <b>Consumo<br/>mensual (kWh)</b> |
|-----------------|---------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Laborable       | 6.33                            | 22              | 139.3                            |
| Fin de semana   | 7.67                            | 8               | 61.4                             |
| TOTAL           |                                 | 30              | 200                              |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en hábitos de uso doméstico

(Osinerghmin, 2019–2020).

#### Anexo 4: Costos y análisis económico extendido

En este anexo se presenta el análisis económico detallado del sistema fotovoltaico autónomo dimensionado para una vivienda tipo en Lima Metropolitana (200 kWh/mes, cobertura FV del 70 %). Se consideran costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, así como el análisis de rentabilidad con tarifas eléctricas residenciales (BT5).

**Tabla A12**

Inversión inicial estimada del sistema FV autónomo

| Concepto                                  | Cantidad | Costo unitario<br>(USD) | Subtotal (USD) |
|-------------------------------------------|----------|-------------------------|----------------|
| Módulo FV 450 Wp                          | 3        | 180                     | 540            |
| Inversor 2.5 kW 48 V                      | 1        | 750                     | 750            |
| Controlador MPPT 60 A                     | 1        | 300                     | 300            |
| Batería LiFePO <sub>4</sub> 48 V – 150 Ah | 1        | 1200                    | 1200           |
| Estructura y montaje                      | -        | 400                     | 400            |
| Cableado y protecciones                   | -        | 250                     | 250            |
| Mano de obra                              | -        | 300                     | 300            |
| <b>TOTAL</b>                              |          |                         | <b>3740</b>    |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en precios de mercado (2024) y referencias técnicas nacionales (Cruz Ornetta, 2012; Osinergmin, 2019).

**Tabla A13**

Costos operativos y de mantenimiento anual

| <b>Concepto</b>                               | <b>Costo anual (USD)</b> |
|-----------------------------------------------|--------------------------|
| Mantenimiento preventivo (limpieza, revisión) | 100                      |
| Reposición de componentes menores             | 50                       |
| <b>TOTAL</b>                                  | <b>150</b>               |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en prácticas de operación FV residencial (Medina, 2006; Perpiñán, 2018).

**Tabla A14**

Tarifas eléctricas residenciales de referencia (BT5)

| <b>Tarifa BT5 (residencial)</b> | <b>Costo por kWh (USD)</b> | <b>Referencia</b>  |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------|
| Promedio 2023                   | 0.17                       | Osinerghmin, 2023  |
| Proyección 2030 (+10 %)         | 0.19                       | Elaboración propia |

Fuente: Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Osinerghmin (2023).

**Tabla A15**

Ahorro anual estimado y periodo de retorno

| <b>Concepto</b>               | <b>Valor</b> |
|-------------------------------|--------------|
| Consumo mensual de referencia | 200 kWh      |
| Cobertura FV                  | 70 %         |
| Ahorro mensual estimado       | 23.80 USD    |
| Ahorro anual estimado         | 285.60 USD   |
| Periodo de retorno simple     | 13.1 años    |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Osinerghmin (2020) y Rivera Velásquez (2022).

## Anexo 5: Normativa técnica aplicable

Este anexo presenta una síntesis de la normativa técnica relevante para el diseño, instalación y operación de sistemas fotovoltaicos autónomos en el Perú, en base al Código Nacional de Electricidad – Utilización (CNE-BT), y su correspondencia con normas internacionales IEC y NEC.

**Tabla A16**

Requisitos del Código Nacional de Electricidad – BT aplicables a sistemas FV autónomos

| Artículo CNE-BT | Requisito técnico                                    | Aplicación en el sistema FV                                |
|-----------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Art. 230        | Conexión a tierra de estructuras y marcos metálicos  | Estructura soporte de módulos conectada a pozo a tierra    |
| Art. 240        | Protección contra sobre corriente                    | Fusibles e interruptores termomagnéticos en CC y AC        |
| Art. 280        | Conductores eléctricos: capacidad y caída de tensión | Dimensionamiento de cables CC y AC según carga y distancia |
| Art. 300        | Protección diferencial                               | Instalación de interruptor diferencial en salida AC        |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en Ministerio de Energía y Minas (2011).

**Tabla A17**

Correspondencia entre normativa nacional e internacional aplicable a sistemas FV

| <b>Norma internacional</b> | <b>Requisito técnico</b>                | <b>Aplicación en el sistema FV</b>                  |
|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| IEC 60364-7-712            | Instalaciones eléctricas de sistemas FV | Requisitos generales de diseño y protecciones CC/AC |
| IEC 61730 / 61215          | Seguridad y calidad de módulos FV       | Módulos 450 Wp certificados bajo IEC                |
| IEC 62933                  | Sistemas de almacenamiento de energía   | Banco de baterías LiFePO <sub>4</sub> con BMS       |
| NEC 690 (NFPA 70)          | Requisitos eléctricos para FV           | Esquema de protecciones y seccionamiento en CC      |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en International Electrotechnical Commission (2020), National Fire Protection Association (2020) y Ministerio de Energía y Minas (2021).

## Anexo 6: Simulaciones y gráficas de rendimiento

En este anexo se presentan resultados de simulaciones realizadas con software de libre acceso como PVGIS, PVSyst (versión demo) y scripts en Python, con el objetivo de validar el rendimiento esperado del sistema fotovoltaico autónomo dimensionado en capítulos anteriores.

**Tabla A18**

Simulación mensual del sistema FV con PVGIS (1,35 kWp – Lima Metropolitana)

| <b>Mes</b>   | <b>Energía generada<br/>(kWh)</b> | <b>Energía<br/>consumida (kWh)</b> | <b>Cobertura FV<br/>(%)</b> |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Enero        | 155                               | 200                                | 78                          |
| Febrero      | 140                               | 180                                | 77                          |
| Marzo        | 150                               | 190                                | 79                          |
| Abril        | 145                               | 185                                | 78                          |
| Mayo         | 130                               | 170                                | 76                          |
| Junio        | 120                               | 160                                | 75                          |
| Julio        | 125                               | 165                                | 76                          |
| Agosto       | 135                               | 175                                | 77                          |
| Setiembre    | 140                               | 180                                | 78                          |
| Octubre      | 150                               | 190                                | 79                          |
| Noviembre    | 155                               | 195                                | 79                          |
| Diciembre    | 160                               | 200                                | 80                          |
| <b>TOTAL</b> | <b>1705</b>                       | <b>2135</b>                        | <b>78</b>                   |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en datos PVGIS (2023).

**Tabla A19****Comparación de escenarios de simulación con PVSyst (demo)**

| <b>Escenario</b>     | <b>PR (%)</b> | <b>Pérdidas por temperatura (%)</b> | <b>Pérdidas por sombras (%)</b> | <b>Energía anual (kWh)</b> |
|----------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Ideal (sin pérdidas) | 85            | 0                                   | 0                               | 1800                       |
| Con pérdidas reales  | 75            | 6                                   | 4                               | 1700                       |
| Propuesta tesis      | 74            | 7                                   | 5                               | 1680                       |

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en PVSyst (versión demo, 2023).

**Tabla A20****Resultados de simulación diaria con script en Python**

| <b>Día</b> | <b>Irradiancia diaria (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Energía generada (kWh)</b> | <b>Factor de rendimiento</b> |
|------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1          | 5.2                                           | 4.8                           | 0.92                         |
| 2          | 5.1                                           | 4.7                           | 0.92                         |
| 3          | 5.3                                           | 4.9                           | 0.93                         |
| 4          | 5.0                                           | 4.6                           | 0.92                         |
| 5          | 5.4                                           | 5.0                           | 0.93                         |

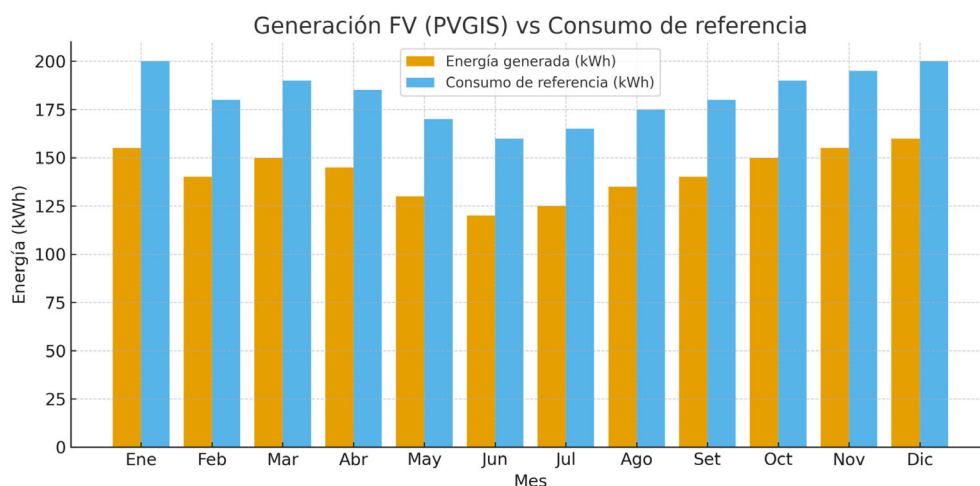
Fuente: Elaboración propia (2025) con base en modelado Python y datos PVGIS (2023).

Nota: Las simulaciones presentadas son consistentes con el dimensionamiento planteado y validan una cobertura aproximada del 70–78 % de la demanda anual de la vivienda tipo. Estos resultados permiten sustentar la factibilidad del sistema y constituyen evidencia adicional para su implementación real.

## Anexo 7: Gráficas de rendimiento del sistema fotovoltaico

### Figura A1

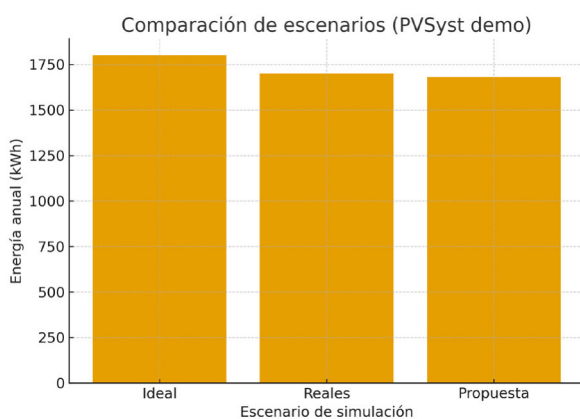
Comparación mensual entre la generación FV simulada (PVGIS) y el consumo de referencia



Fuente: Elaboración propia (2025) con base en PVGIS (2023) y consumo de referencia de la vivienda tipo.

### Figura A2

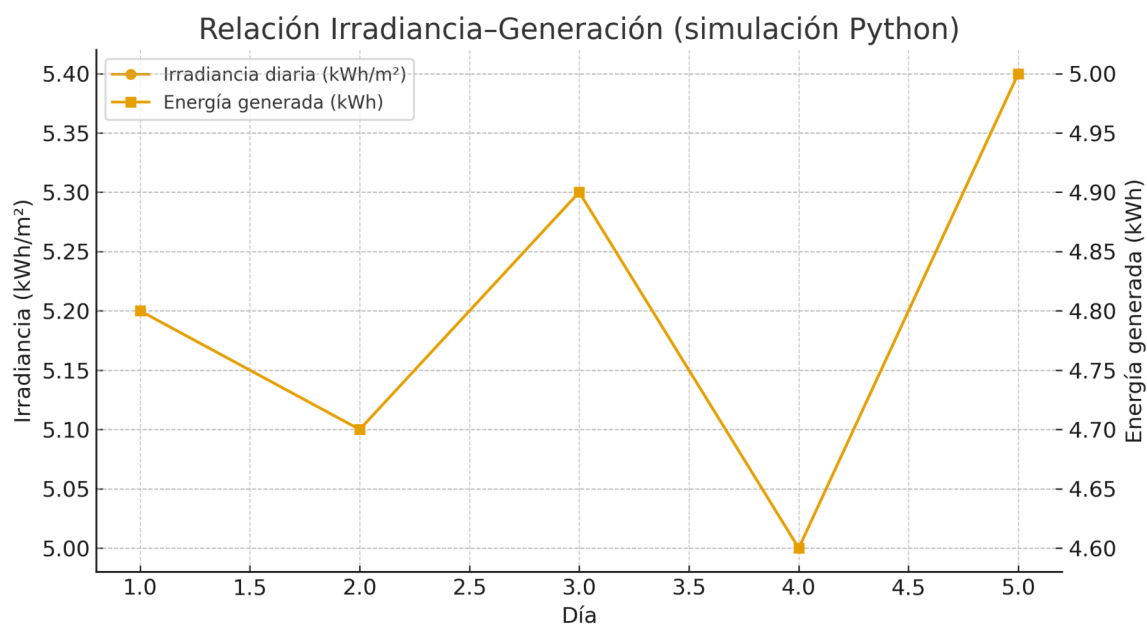
Energía anual generada en escenarios Ideal, Reales y Propuesta (PVSystem, versión demo)



Fuente: Elaboración propia (2025) con base en modelado Python y parámetros del sistema dimensionado.

**Figura A3**

Relación diaria entre irradiancia y energía generada (simulación Python, 5 días)



Fuente: Elaboración propia (2025) con base en simulaciones en Python (2023) y parámetros del sistema dimensionado.