

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electricidad

### **Desarrollo de un Prototipo de Aula Energéticamente Autónoma mediante un Sistema Solar Fotovoltaico con Almacenamiento en Baterías: Caso de Estudio en el Campus Balzay de la Universidad de Cuenca**


Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

**Autor:**

Guido Antonio Vargas González


**Director:**

Vinicio Estuardo Iñiguez Moran

ORCID:  0000-0001-7494-191X

**Co-Director:**

Danny Vinicio Ochoa Correa

ORCID:  0000-0001-5633-1480

**Cuenca, Ecuador**

2025-09-24

## Resumen

El presente trabajo de titulación aborda el desarrollo de un prototipo de aula energéticamente autónoma mediante un sistema solar fotovoltaico con almacenamiento en baterías dentro del campus Balzay de la Universidad de Cuenca. Como punto de partida en este estudio se analizó el recurso solar disponible, estableciendo una comparativa con otras bases de datos para validar la veracidad de los valores de irradiación a implementar en el proyecto. Paralelamente, se llevó la elección del aula prototipo en donde se evaluaron parámetros respecto al nivel de ocupación dentro de las aulas candidatas en el campus Balzay. Consecuentemente, se estudió el perfil de consumo del aula prototipo, permitiendo conocer el nivel de consumo para el dimensionamiento y el comportamiento de la demanda dentro de una institución universitaria. Conocer este comportamiento permitiría dimensionar el sistema fotovoltaico propuesto de manera óptima. Luego, se procedió con el dimensionamiento del sistema fotovoltaico con almacenamiento basado en las necesidades del aula piloto, considerando equipos disponibles en el mercado ecuatoriano y sus parámetros técnicos para determinar la disposición de los equipos. Después se evaluó al sistema mediante la simulación en PVsyst con el objetivo de ratificar los resultados obtenidos en el dimensionamiento. Finalmente, a pesar de no poder evaluar el sistema propuesto debido a indisponibilidad de algunos equipos, se analizó la calidad de energía de un sistema ya incorporado en el laboratorio de Micro-Red que presenta exactamente las mismas condiciones de operación con las cuales se dimensionó el sistema para el aula prototipo, validando así el proyecto propuesto.

*Palabras clave del autor: sistemas fotovoltaicos, autoabastecimiento, generación distribuida, energía solar, PVsyst, calidad de energía*



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

**Repositorio Institucional:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

This thesis presents the development of a prototype energy-autonomous classroom powered by a photovoltaic solar system with energy storage, located on the Balzay campus of the University of Cuenca. The study begins with an analysis of the available solar resource, including a comparison with other databases to validate the accuracy of the irradiation values used in the project. Simultaneously, the selection of the prototype classroom was carried out by evaluating parameters related to occupancy levels in candidate classrooms on the Balzay campus. Subsequently, the energy consumption profile on the selected classroom was studied to determine both the overall consumption level and the demand behavior within a university setting. Understanding this behavior enabled the optimal sizing of the proposed photovoltaic system. The system was then designed based on the energy needs of the pilot classroom, taking into account commercially available equipment in the Ecuadorian market and their technical specifications to define the system layout. The proposed system was evaluated through simulation using PVsyst, with the aim of validating the design results. Although it was not possible to implement the proposed system due to the unavailability of certain components, the energy quality of an existing system in Microgrid Laboratory – operating under the same conditions considered for the classroom prototype – was analyzed, thereby validating the feasibility and reliability of the proposed project.

*Author Keywords: photovoltaic systems, self-supply, distributed generation, solar energy, PVsyst, power quality*



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

**Institutional Repository:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

## Índice de contenido

Generalidades.....	11
1.1. Introducción .....	11
1.2. Antecedentes.....	12
1.3. Objetivos .....	14
1.3.1. Objetivo general.....	14
1.3.2. Objetivos Específicos.....	14
1.4. Alcance.....	15
1.5. Justificación .....	15
Marco Teórico.....	17
2.1. Sistemas de Generación Distribuida.....	17
2.1.1. Sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento energético.....	17
2.1.2. Sistema de generación distribuida para autoabastecimiento con almacenamiento de energía en baterías para operación de respaldo .....	18
2.2. Legislación Ecuatoriana para sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento .....	18
2.2.1. Marco normativo de la generación distribuida para el autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica .....	18
2.2.2. Marco normativo para la Calidad del Servicio de Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica.....	20
2.2.2.1. Nivel de voltaje .....	21
2.2.2.2. Perturbación rápida de voltaje (Flicker).....	21
2.2.2.3. Distorsión armónica de voltaje .....	22
2.2.2.4. Desequilibrio de voltaje.....	22
2.2.2.5. Distorsión armónica de corriente .....	23

2.3. Sistemas de Generación de Energía Solar Fotovoltaica .....	24
2.3.1. Energía solar fotovoltaica .....	24
2.3.2. Recurso primario – Radiación solar.....	24
2.3.3. Componentes principales .....	25
2.3.3.1. Panel solar .....	25
2.3.3.2. Inversores.....	29
2.3.3.3. Controlador de carga .....	31
2.3.3.4. Estructura de soporte, cableado y protecciones .....	31
2.3.3.4.1. Estructura de soporte y disposición del arreglo .....	32
2.3.3.4.2. Cableado del sistema.....	33
2.3.3.4.3. Protecciones y puesta a tierra .....	34
2.3.4. Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en baterías .....	35
2.3.4.1. Plomo-ácido.....	35
2.3.4.2. Iones de litio .....	36
2.4. Tipos de sistemas fotovoltaicos .....	36
2.4.1. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.....	37
2.4.2. Sistemas fotovoltaicos autónomos .....	37
2.4.3. Sistemas fotovoltaicos híbridos .....	38
2.5. Diseño de sistemas de Generación de Energía Solar Fotovoltaica con almacenamiento en baterías .....	39
Metodología .....	43
3.1. Ubicación y Condiciones del Emplazamiento.....	43
3.1.1. Ubicación .....	43
3.1.2. Recurso solar.....	44

3.2. Elección del aula prototípica .....	48
3.3. Estimación de la demanda energética del aula prototipo. ....	52
3.4. Dimensionamiento y diseño del sistema fotovoltaico .....	55
3.4.1. Selección de equipos .....	55
3.4.2. Determinación de número de paneles, inversores y baterías .....	58
3.4.3. Configuración del sistema .....	62
3.5. Simulación del sistema fotovoltaico .....	64
3.6. Validación del prototipo en el Laboratorio de Micro-Red .....	71
3.6.1. Variación de nivel de voltaje $\Delta V$ .....	74
3.6.2. Perturbación rápida de voltaje (Flicker – $P_{st}$ ).....	74
3.6.3. Distorsión armónica total de voltaje (THD) .....	75
3.6.4. Distorsión armónica total de corriente (TDD).....	75
3.6.4. Estabilidad de frecuencia .....	77
Análisis de Resultados y Discusión .....	79
4.1. Recurso solar .....	79
4.2. Demanda eléctrica.....	81
4.3. Producción del sistema.....	82
4.4. Almacenamiento del sistema .....	82
4.5. Calidad de energía y validación del prototipo.....	83
Conclusiones y Recomendaciones .....	85
5.1. Conclusiones .....	85
5.2. Recomendaciones.....	87
Referencias.....	89
Anexos.....	94

## Índice de figuras

Figura 1. Modalidades de los SGDA. ....	20
Figura 2. Panel fotovoltaico.....	26
Figura 3. Clasificación de celda, panel y modulo en orden creciente. ....	26
Figura 4. Curva I - V típica de un panel FV. ....	28
Figura 5. Conexiones entre paneles FV .....	29
Figura 6. Inversor.....	30
Figura 7. Símbolo del convertidor (inversor).....	30
Figura 8. Clasificación de inversores según su topología.....	31
Figura 9. Controlador de carga .....	32
Figura 10. Orientación e inclinación para un panel solar .....	33
Figura 11. Esquema de un sistema FV conectado a la red .....	37
Figura 12. Esquema de un sistema FV aislado .....	38
Figura 13. Esquema de un sistema FV hibrido.....	39
Figura 14. Ubicación del Campus Balzay de la Universidad de Cuenca.....	44
Figura 15. Curvas características de irradiancia solar a partir de mediciones en el Laboratorio de Micro-Red .....	45
Figura 16. Estimación de HSP a partir del mapa de Insolación global promedio del Ecuador .....	48
Figura 17. Curva de perfil de demanda del aula prototípica .....	53
Figura 18. Curva de demanda promedio: días laborales vs. fin de semana .....	54
Figura 19. Diagrama unifilar del SFV para el aula prototipo con almacenamiento en baterías .....	62
Figura 20. Disposición de arreglos fotovoltaicos existentes en el Laboratorio de Micro-Red. ....	63

Figura 21. Configuración de la demanda para la simulación en PVsyst. ....	65
Figura 22. Configuración de la orientación e inclinación para la simulación en PVsyst. ....	66
Figura 23. Configuración del módulo fotovoltaico para la simulación en PVsyst.....	67
Figura 24. Configuración de baterías para la simulación en PVsyst. ....	68
Figura 25. Diagrama de pérdidas energéticas del sistema fotovoltaico simulado en PVsyst. .....	69
Figura 26. Balance mensual de generación y consumo energético del sistema simulado - PVsyst.....	70
Figura 27. Producción mensual normalizada del sistema simulado - PVsyst.....	70
Figura 28. Índice de desempeño mensual del sistema simulado - PVsyst.....	71
Figura 29. Diagrama unifilar del SFV implementado en el Laboratorio de Micro-Red.....	72
Figura 30. Curva del registro de variación de nivel de voltaje para el SFV del Laboratorio de Micro-Red .....	74
Figura 31. Curva del registro de flickers para el SFV del Laboratorio de Micro-Red.....	76
Figura 32. Curva del registro de THD para el SFV del Laboratorio de Micro-Red .....	76
Figura 33. Curva del registro de TDD para el SFV del Laboratorio de Micro-Red .....	77
Figura 34. Curva del registro de variación de frecuencia para el SFV del Laboratorio de Micro-Red .....	78
Figura 35. Comportamiento mensual de HSP Micro-Red vs. NNREL vs. PVsyst.....	81

**Índice de tablas**

Tabla 1. Límite de potencia nominal para SGDA.....	19
Tabla 2. Nivel de voltaje en el punto de conexión. ....	19
Tabla 3. Límites máximos del factor de distorsión armónica de voltaje. ....	22
Tabla 4. Niveles máximos de distorsión armónica de corriente. ....	24
Tabla 5. HSP disponibles por cada día de cada mes a partir de mediciones en el Laboratorio de Micro-Red. ....	46
Tabla 6. Comparativa entre HSP: Laboratorio de Micro-Red vs. NREL.....	47
Tabla 7. Número de estudiantes de acuerdo al horario de clases académico. ....	50
Tabla 8. Registro de ocupación semanal de las aulas.....	50
Tabla 9. Inventario y estimación de carga eléctrica por aula. ....	51
Tabla 10. Comparación final de uso y demanda estimada. ....	52
Tabla 11. Energía diaria consumida y proyección anual para el aula prototipo. ....	54
Tabla 12. Principales características eléctricas - Paneles solares.....	56
Tabla 13. Principales características eléctricas – Inversores de corriente.....	57
Tabla 14. Principales características eléctricas - Baterías.....	58
Tabla 15. Calibre de conductores y Capacidad de interruptores para el SFV propuesto. ....	61
Tabla 16. Comparación técnica entre el prototipo propuesto y el sistema del Laboratorio de Micro-Red. ....	73
Tabla 17. Resultados del análisis de calidad de energía para el SFV del Laboratorio de Micro-Red. ....	73

### Agradecimiento y dedicatoria

A Dios, por ser mi guía durante cada paso de mi vida personal y académica, brindándome su ayuda en todo momento, permitiéndome crecer cada día para perseguir y alcanzar mis objetivos.

A las personas más importantes en mi vida: A mi familia por su constante apoyo. A mis padres, por toda su sabiduría transmitida, su amor e invaluable compañía, que son la base de todo lo que soy. A mis hermanos, por siempre estar a mi lado y por todas las risas y adversidades compartidas. A Ismael y a Lesly, por brindarme su apoyo incondicional y siempre creer en mí.

A mis maestros, quienes me acompañaron en este proceso de aprendizaje, compartiendo su sabiduría y conocimientos, impulsándome hacia la vida profesional. De manera especial, extendiendo mi gratitud al MSc. Vinicio Iñiguez y al PhD. Danny Ochoa, no solo por guiarme durante el desarrollo de este proyecto de titulación, sino por la confianza depositada en mi potencial, motivándome a mejorar continuamente para convertirme en un gran profesional.

Finalmente, agradezco a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso al Laboratorio de Micro-Red, Facultad de Ingeniería, en cuyas instalaciones fue realizado el presente proyecto de titulación, por permitirme utilizar sus equipos, y por autorizar a su personal a proporcionarme el apoyo técnico necesario para llevar a cabo las actividades experimentales del proyecto.

## Generalidades

### 1.1. Introducción

A lo largo de los años, la dependencia de los recursos energéticos para el desarrollo de las sociedades ha tomado un rol protagónico. En la actualidad, en todos y cada uno de los países alrededor del mundo se requiere de la constante supervisión técnica y cuidado de los sistemas de generación existentes, conjuntamente con el incremento planificado y sostenido de la generación. Para esto es necesario aprovechar de forma eficiente los recursos energéticos, sobre todo de las fuentes de energía renovable para abastecer la demanda de energía, contar con un nivel adecuado de respaldo y asegurar la operación segura y confiable del sistema eléctrico de potencia. Solo de esta manera se pueden alcanzar las tan anheladas soberanía y sostenibilidad energética. El constante crecimiento de la demanda energética, combinado con la limitada capacidad de generación eléctrica en países en desarrollo, ha evidenciado la vulnerabilidad de los sistemas de suministro convencionales [1]. En Ecuador, al tener una matriz energética altamente dependiente de centrales hidroeléctricas, se encuentra vulnerable ante las variaciones hidrológicas. Durante varios meses de 2024, esta vulnerabilidad se hizo evidente debido a una inusual sequía que afectó al país. Esta situación obligó a las autoridades a recurrir a racionamientos de energía, los cuales no solo fueron consecuencia de la variabilidad hidrológica, sino también del incumplimiento de proyectos para el incremento de la capacidad de generación eléctrica y de la falta de mantenimiento de las centrales existentes, tanto hidroeléctricas como termoeléctricas. Esto ha afectado a sectores estratégicos como la educación, donde un suministro confiable es esencial para garantizar el desarrollo académico.

Estos desafíos resaltan la necesidad de integrar tecnologías energéticas sostenibles que garanticen la resiliencia y la continuidad del suministro. Bajo ese escenario, las energías renovables han emergido como una alternativa tecnológica viable para diversificar la matriz energética, aprovechando recursos como el sol, el viento, el movimiento de los cuerpos de agua, el calor de la Tierra y la biomasa; con el fin de reducir la dependencia de los combustibles fósiles [2]. En particular, la energía solar fotovoltaica, una de las tecnologías con mayor acogida gracias a su adaptabilidad, eficiencia y sostenibilidad; aprovecha la radiación solar convirtiéndola en energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos. Además, al incorporar sistemas de almacenamiento en baterías, es posible garantizar la disponibilidad de energía en cualquier momento, incluso en ausencia de sol, para cubrir la demanda energética del consumidor.

En ese contexto, la incorporación de tecnologías de generación distribuida, que según la IEEE se define como la generación de electricidad mediante instalaciones lo suficientemente pequeñas en comparación con las centrales generadoras, que se caracterizan por implementarse cerca o en los mismos centros de consumo para abastecer de energía a los usuarios y permitiendo su interconexión al sistema eléctrico, brindando soporte al sistema de distribución de electricidad [3]. A nivel global, la adopción de tecnologías de generación distribuida y microrredes ha demostrado ser una solución eficiente para electrificar comunidades aisladas, reducir la huella de carbono, aumentar la resiliencia de la red y garantizar el suministro de energía frente a interrupciones o emergencias tales como eventos climáticos extremos [2], [4]. La generación distribuida desempeña un rol clave al permitir la descentralización de la generación eléctrica; bajo este preámbulo, los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica han ganado popularidad en las últimas décadas debido a que aprovecha la energía del sol, que es un recurso inagotable, la tecnología es ampliamente difundida y favorece a la conservación del medio ambiente; reduciendo las pérdidas asociadas al transporte de energía y alivian la carga de las redes de distribución, mejorando su estabilidad y confiabilidad.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar y validar un prototipo de aula energéticamente autónoma en el campus Balzay de la Universidad de Cuenca, empleando un sistema solar fotovoltaico con almacenamiento en baterías. Esta solución está orientada a operar tanto en modo aislado como conectado a la red, garantizando un suministro energético continuo en escenarios de crisis. El proyecto también busca evaluar la viabilidad técnica y normativa de esta tecnología en un entorno educativo, sentando las bases para su replicabilidad en otros espacios. Al integrar conceptos de energías renovables, almacenamiento energético y generación distribuida, este trabajo no solo responde a las necesidades energéticas inmediatas del campus, sino que también contribuye al desarrollo sostenible, promoviendo prácticas innovadoras que fortalecen la resiliencia del sistema eléctrico y minimizan su impacto ambiental.

## **1.2. Antecedentes**

El cambio climático y la crisis energética global han impulsado la transición hacia fuentes de energía renovable, con el objetivo de mitigar el impacto ambiental y garantizar la sostenibilidad del suministro energético. En este marco, la energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las tecnologías más prometedoras, destacando por su capacidad de adaptación a diferentes escalas y su versatilidad para integrarse en sistemas de generación distribuida. Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA), la

capacidad instalada de energía solar fotovoltaica alcanzó un crecimiento anual del 22% entre 2019 y 2023, contribuyendo significativamente al desarrollo de comunidades resilientes y sostenibles [1].

A nivel mundial, países como Alemania, Estados Unidos y Australia han liderado la adopción de sistemas solares fotovoltaicos, tanto a gran escala como en generación distribuida. Programas como el "Energiewende", o el Kreditanstalt für Wiederaufbau - KfW 275 alemán han incrementado la autosuficiencia energética residencial al promover la instalación de sistemas solares con almacenamiento mediante subsidios [5]. El "Self-Generation Incentive Program" de California ha promovido la integración de estas tecnologías en entornos urbanos y rurales, mejorando la calidad del suministro eléctrico y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles, además de garantizar la resiliencia ante desastres naturales [6]. Australia se destaca por su alta penetración de sistemas fotovoltaicos, respaldada por incentivos como el Small-scale Renewable Energy Scheme y proyectos emblemáticos como la Hornsdale Power Reserve, que mejora la estabilidad de la red y la autonomía energética; sin embargo, la alta penetración de sistemas solares fotovoltaicos residenciales ha generado una sobreproducción de energía durante el día, llevando a niveles críticos de baja demanda que amenazan la estabilidad de la red eléctrica, impulsando a los entes reguladores australianos a implementar medidas como la detención temporal de la generación fotovoltaica residencial y la desconexión de sistemas de almacenamiento de estos, con el fin de preservar la estabilidad de la red eléctrica. Estos casos ilustran cómo esta tecnología impulsa el desarrollo sostenible, la resiliencia y la calidad de vida [7], [8], también demuestran el impacto positivo de los sistemas fotovoltaicos con almacenamiento, especialmente en contextos donde la estabilidad del suministro es crítica.

En América Latina, la adopción de tecnologías solares ha crecido rápidamente en las últimas décadas, impulsada por el alto potencial de irradiación solar y la necesidad de diversificar las matrices energéticas. Países como Brasil, México y Chile han implementado políticas y programas específicos para fomentar la generación distribuida. En Chile, el programa "Comuna Energética" ha permitido a zonas rurales adoptar sistemas híbridos que combinan energía solar y almacenamiento, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles [9]. Brasil destaca con el programa "Luz para Todos" que ha electrificado comunidades aisladas en la Amazonía mediante sistemas fotovoltaicos autónomos, transformando la calidad de vida de la población [10]. En México, regiones como Oaxaca han implementado proyectos apoyados por el Fondo para la Transición Energética, promoviendo la autosuficiencia energética en comunidades indígenas [11]. Estas experiencias regionales destacan el papel

de la energía solar como una solución efectiva para enfrentar desafíos energéticos en contextos diversos.

En Ecuador, la matriz energética ha dependido históricamente de fuentes hidroeléctricas, lo que ha generado vulnerabilidades en períodos de sequía prolongada. Esta dependencia se hizo evidente durante la crisis energética de 2024, en donde además del fenómeno hidrológico que enfrentó el país, el incumplimiento de proyectos para el incremento de la capacidad de generación eléctrica y de la falta de mantenimiento de las centrales existentes jugaron un rol determinante trayendo como consecuencias racionamientos eléctricos de hasta 14 horas diarias, que se extendió por 160 días y finalizó el 20 de diciembre de 2024 [12]. Aunque la Regulación ARCERNNR 008-2023 [13] ha establecido lineamientos para la generación distribuida, su aplicación aún es limitada, especialmente en sectores como la educación, donde un suministro confiable es esencial para el desarrollo académico y tecnológico.

A nivel local, el campus Balzay de la Universidad de Cuenca enfrenta desafíos relacionados con la continuidad del suministro eléctrico, exacerbados por los recientes racionamientos energéticos. La implementación de un aula energéticamente autónoma, mediante un sistema solar fotovoltaico con almacenamiento en baterías, representa una solución técnica y sostenible para garantizar la operación ininterrumpida de las actividades académicas. Además, este proyecto no solo responde a una necesidad inmediata, sino que también promueve la sostenibilidad ambiental, y de esta manera ir sentando las bases para un desarrollo energético más resiliente y sostenible en el sector educativo [14], [15].

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Desarrollar un prototipo de aula energéticamente autónoma mediante un sistema de generación solar fotovoltaico con almacenamiento en baterías para un aula del Campus Balzay de la Universidad de Cuenca.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Analizar el perfil de consumo energético del aula prototípica en el campus Balzay para dimensionar el sistema fotovoltaico de manera óptima.
- Diseñar un sistema de generación de energía solar fotovoltaico con almacenamiento en baterías, adaptado a la demanda eléctrica identificada, garantizando su operación eficiente y autónoma.

- Validar el prototipo en el Laboratorio de Micro-Red mediante la evaluación de su desempeño en diferentes condiciones de operación.

#### **1.4. Alcance**

El alcance de este proyecto de titulación se centrará en el diseño y validación de un prototipo de aula energéticamente autónoma mediante un sistema fotovoltaico con almacenamiento en el Campus Balzay de la Universidad de Cuenca. La selección de esta aula piloto permitirá realizar un análisis integral de la viabilidad técnica, y operativa del sistema en un entorno educativo representativo.

El proyecto abarcará el levantamiento de cargas y la recopilación del perfil energético del aula seleccionada, lo que servirá como base para el dimensionamiento óptimo del sistema fotovoltaico y su almacenamiento en baterías. Este dimensionamiento considerará las condiciones climáticas locales, asegurando la eficiencia y confiabilidad del sistema en diferentes escenarios operativos, mediante la simulación de diversas condiciones de funcionamiento, como la operación en isla para garantizar la continuidad energética durante cortes de suministro, así como la operación conectada a la red sin inyección de energía. Estas simulaciones permitirán evaluar el desempeño del sistema frente a variaciones en la demanda y disponibilidad de energía, optimizando su diseño para maximizar la autonomía energética.

Adicionalmente, se realizará un análisis del marco normativo vigente en Ecuador, asegurando que el sistema propuesto cumpla con las regulaciones nacionales relacionadas con la generación distribuida y la calidad de la energía. Este cumplimiento será esencial para garantizar la viabilidad a largo plazo del sistema y su integración segura en el contexto educativo. Se espera que este proyecto no solo brinde una solución inmediata a los desafíos energéticos, sino que también sirva como modelo replicable para otras aulas e instituciones educativas, fomentando prácticas sostenibles.

Finalmente, los resultados obtenidos servirán como base para validar el proyecto propuesto y posteriormente analizar su potencial de escalabilidad a otros entornos.

#### **1.5. Justificación**

Este proyecto se enfoca en la necesidad de desarrollar soluciones energéticas sostenibles que respondan ante potenciales inconvenientes en el suministro del servicio de energía eléctrica en Ecuador. Las limitaciones en la infraestructura eléctrica y los frecuentes racionamientos de energía han afectado significativamente a diversos sectores, incluyendo

la educación, donde un suministro energético confiable es crucial para el desarrollo académico.

El uso de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento en baterías se presenta como una solución técnica. Ecuador, con su alto potencial solar, ofrece condiciones ideales para la implementación de esta tecnología. Aprovechar este recurso renovable no solo permite reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales, sino que también contribuye al cumplimiento de los compromisos ambientales nacionales e internacionales.

Este proyecto tiene como objetivo fortalecer la resiliencia del sistema educativo mediante el desarrollo de un aula piloto energéticamente autónoma en el campus Balzay de la Universidad de Cuenca. Al abordar directamente los desafíos energéticos actuales, se crea un precedente para la integración de tecnologías limpias en instituciones educativas, promoviendo la sostenibilidad y la innovación. Además, este proyecto busca generar un impacto a largo plazo al proporcionar un modelo replicable que pueda incorporarse tanto para la misma Universidad de Cuenca como para otras instituciones educativas. El desarrollo de este proyecto fomentará la formación práctica en energías renovables, permitiendo adquirir conocimientos técnicos aplicables en el futuro. Este enfoque educativo también reforzará el compromiso de la universidad con la sostenibilidad y el desarrollo de soluciones tecnológicas adaptadas a las necesidades locales.

Finalmente, el análisis del desempeño y viabilidad del sistema aportará datos concretos para respaldar su efectividad, demostrando su capacidad para enfrentar los retos energéticos del país. Al integrar tecnología renovable y sostenible, este proyecto contribuye a una educación resiliente, con un enfoque hacia el cuidado del medio ambiente y la adopción de prácticas responsables.

## Marco Teórico

### 2.1. Sistemas de Generación Distribuida

Los sistemas de generación distribuida (GD) consisten en la descentralización de generación o el almacenamiento de energía eléctrica, a pequeña escala, cerca de los centros de consumo, con la opción de interconectarse a la red eléctrica para fines de comercialización. La implementación de la generación distribuida tiene como principales objetivos la reducción de las pérdidas de transmisión de energía, mejorar la eficiencia del sistema y el aprovechamiento de otros tipos de recursos de energía primaria; mejorando la calidad y fiabilidad del suministro del servicio eléctrico y diversificando la matriz energética del sistema [3], [16].

Entre las tecnologías aplicadas a la GD, la generación fotovoltaica resalta por su gran acogida a nivel global, en países como Japón, Alemania, España y Estados Unidos, en donde la generación de electricidad mediante esta tecnología ha tenido un crecimiento importante en los últimos años. Aunque la generación fotovoltaica ha traído grandes beneficios dentro de las sociedades, evaluaciones técnicas en la gestión de generadores distribuidos indican que se deben considerar factores para la implementación de sistemas fotovoltaicos, tales como la emisión de armónicos por los inversores, la regulación de voltaje y los sistemas de protección de las redes. Con la adopción de generación distribuida junto al uso de fuentes energías renovables se pretende reducir la huella de carbono, ya que se estima que el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero son causadas por la generación de energía eléctrica tradicional [17].

#### 2.1.1. Sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento energético

Un sistema de generación distribuida para autoabastecimiento (SGDA), es la implementación de la generación distribuida basada en el aprovechamiento de energías renovables, permitiendo generar electricidad de forma local, reduciendo la dependencia de las redes eléctricas centralizadas y contribuyendo al autoconsumo energético. Los SGDA al tener una interconexión con la red eléctrica, tienen la opción de inyectar los excedentes de producción de energía, brindando beneficios tanto técnicos para la red eléctrica, como económicos para el propietario del SGDA; y ambientales, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero [18].

### **2.1.2. Sistema de generación distribuida para autoabastecimiento con almacenamiento de energía en baterías para operación de respaldo**

Un SGDA con almacenamiento es un sistema que integra fuentes de generación de energía renovables para el autoconsumo junto a sistemas de almacenamiento, dando la posibilidad de crear un sistema autónomo en donde se puede generar, almacenar y consumir energía de forma local. Este sistema optimiza el uso de la energía almacenada, liberándola cuando la demanda es alta o cuando la generación renovable es insuficiente, lo que reduce la dependencia de la red eléctrica; además, la implementación de baterías ofrece un sistema de respaldo en el caso de cortes energéticos desde la red principal, garantizando así la continuidad del servicio eléctrico [19].

## **2.2. Legislación Ecuatoriana para sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento**

### **2.2.1. Marco normativo de la generación distribuida para el autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica**

La Regulación Nro. ARCERNNR-008/23 encargada de establecer los lineamientos para la habilitación, instalación, conexión, operación y mantenimiento de Sistemas de Generación Distribuida para Autoabastecimiento (SGDA) para consumidores regulados. En esta regulación se establece la caracterización y dimensionamiento de SGDAs, las modalidades de autoabastecimiento, condiciones de instalación y operación, y procedimientos para la factibilidad de conexión y determinación de energía facturable [13].

Se considera un SGDA de consumidores regulados cuando la potencia nominal del sistema está limitada por lo establecido en el numeral 9 de la regulación (ver Tabla 1); se encuentra conectado en sincronía con la red de distribución, aprovechando de un recurso renovable no convencional y contar opcionalmente de sistemas de almacenamiento de energía. Al tener conectado un SGDA al sistema de distribución, este contribuye con la disminución de pérdidas de electricidad, mejora los perfiles de voltaje, disminuye la cargabilidad de los equipos, entre otros.

Tabla 1. Límite de potencia nominal para SGDA [13].

Límite de potencia nominal	
Sin inyección a la red de distribución	Limitada por la demanda de potencia máxima registrada y la capacidad de conexión aprobada por la distribuidora
Con inyección a la red de distribución	Potencia nominal limitada a 2 MW.

Dentro de esta regulación se establecen categorías según el nivel de voltaje en el punto de conexión, mismos que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Nivel de voltaje en el punto de conexión [13].

Voltaje de conexión	Potencia nominal ( $P_n$ )	Categoría
Bajo voltaje	$P_n \leq 5 \text{ kW}$ , monofásica.	Categoría 1
	$P_n \leq 10 \text{ kW}$ , bifásica.	
	$P_n \leq 50 \text{ kW}$ , trifásica.	
Medio voltaje	$P_n \leq 2 \text{ MW}$ , cuando hay inyección de energía eléctrica a la red de distribución.	Categoría 2
	$P_n$ menor a la capacidad de conexión aprobada por la distribuidora cuando no hay inyección de energía eléctrica a una red de distribución	

Dentro de los lineamientos se establece que para el dimensionamiento de SGDA, el consumidor regulado es el exclusivo responsable de este proceso, realizando los respectivos estudios técnicos, con el fin de cubrir la demanda de energía eléctrica anual; su producción anual debe ser menor o igual a la demanda anual del consumidor. Además, al momento de desarrollar un proyecto de generación distribuida para autoabastecimiento, se pueden contemplar las siguientes modalidades (ver Figura 1):

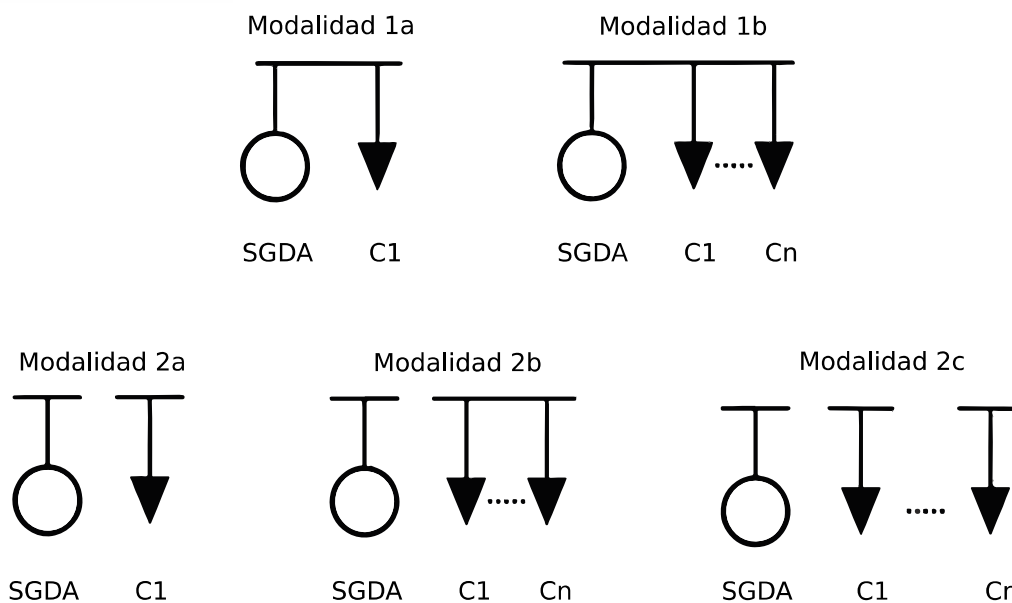


Figura 1. Modalidades de los SGDA [13].

- Modalidad 1a: Autoabastecimiento individual local.
- Modalidad 1b: Autoabastecimiento múltiple local.
- Modalidad 2a: Autoabastecimiento individual remoto.
- Modalidad 2b: Autoabastecimiento múltiple remoto con consumidores concentrados.
- Modalidad 2c: Autoabastecimiento múltiple remoto con consumidores dispersos.

### 2.2.2. Marco normativo para la Calidad del Servicio de Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica

La Regulación No. ARCERNNR 002/20, encargada de establecer los índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica; definiendo los procedimientos de adquisición de datos para su evaluación, a ser cumplidos tanto por las empresas distribuidoras como consumidores. Como aspectos técnicos a destacar en esta regulación, los atributos de la calidad del producto tales como nivel de voltaje, perturbaciones rápidas de voltaje, distorsión armónica y desequilibrio de voltaje, son de vital interés y deben ser monitoreadas con regularidad con equipos especializados (registrando mediciones en intervalos de 10 minutos durante un período mínimo de 7 días continuos) para mantener estos índices en los niveles aceptables [20].

Esta regulación dicta que los atributos de la calidad del producto cumplen cuando al menos el 95% de los valores registrados, en el periodo de medición se encuentran dentro del rango permisible para cada parámetro [20].

### 2.2.2.1. Nivel de voltaje

Indica la variación del voltaje suministrado respecto al voltaje nominal en un punto de conexión [20]; para definir este parámetro se hace uso de la ecuación (1).

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100 [\%] \quad (1)$$

Donde:

- $\Delta V_k$  corresponde a la variación del voltaje en el punto de conexión  $k$  respecto al voltaje nominal,
- $V_k$  representa el voltaje suministrado en el punto  $k$ , determinado como el promedio de las medidas registradas (al menos cada 3 segundos) en un intervalo de 10 minutos.
- $V_N$  es el voltaje nominal en el punto  $k$ .

Los límites admisibles para el índice de nivel de voltaje se establecen como se indica a continuación.

- Para los niveles de alto voltaje (grupo 1 y 2), el rango admisible se encuentra entre el  $\pm 5.0\%$ .
- Para los niveles de medio voltaje, el rango admisible se encuentra entre el  $\pm 6.0\%$ .
- Para los niveles de bajo voltaje, el rango admisible se encuentra entre el  $\pm 8.0\%$ .

### 2.2.2.2. Perturbación rápida de voltaje (Flicker)

Este índice evalúa la severidad por flicker de corta duración ( $P_{st}$ ), conforme la norma IEC 61000-4-15, el cual mide la severidad de las variaciones periódicas de amplitud de voltaje a corto plazo [20]. Este índice se determina mediante la ecuación (2).

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (2)$$

Donde:

- $P_{st}$  es el índice de severidad de flicker de corta duración en el punto de medición, el cual tiene como respectivo límite el de no superar la unidad.
- $P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$  corresponde a los niveles de efecto flicker que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10% y 50% del tiempo total del intervalo de medición.

### 2.2.2.3. Distorsión armónica de voltaje

Este índice evalúa la distorsión armónica individual de voltaje y la distorsión armónica total de voltaje a partir de la ecuación (3), (4) y (5) [20].

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2} \tag{3}$$

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} \times 100 \text{ [%]} \tag{4}$$

$$THD_k = \left[ \frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} \right] \times 100 \text{ [%]} \tag{5}$$

Donde:

- $V_{h,k}$  es la armónica de voltaje  $h$  en el intervalo  $k$  de 10 minutos.
- $V_{h,i}$  es el valor eficaz (*rms*) de la armónica de voltaje  $h$  (para  $h = 2,3, \dots, 50$ ), medido cada 3 segundos ( $i = 1,2, \dots, 200$ ).
- $DV_{h,k}$  es el factor de distorsión individual de voltaje de la armónica  $h$  (para  $h = 2,3, \dots, 50$ ) en el intervalo  $k$  de 10 minutos.
- $THD_k$  es el factor de distorsión armónica total de voltaje.
- $V_{h,1}$  es el valor eficaz (*rms*) de la componente fundamental de voltaje en el punto de medición.

Los límites máximos del factor de distorsión armónica individual y total de voltaje se presenta en la Tabla 3.

*Tabla 3. Límites máximos del factor de distorsión armónica de voltaje [20].*

Nivel de Voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0
Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.0	1.5

### 2.2.2.4. Desequilibrio de voltaje

Este índice se determina mediante la ecuación (6). El valor límite de desequilibrio de voltaje en el punto de medición será de 2% para todos los niveles de tensión [20].

$$\text{Desequilibrio de Voltaje} = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| \times 100 \text{ [\%]} \quad (6)$$

Donde:

- $V^-$  es la componente de secuencia negativa de voltaje, determinado como el promedio de las medidas registradas (al menos cada 3 segundos) en un intervalo de 10 minutos.
- $V^+$  es la componente de secuencia positiva de voltaje, determinado como el promedio de las medidas registradas (al menos cada 3 segundos) en un intervalo de 10 minutos.

### 2.2.2.5. Distorsión armónica de corriente

Este índice evalúa la distorsión armónica individual de corriente y la distorsión armónica total de corriente (distorsión de demanda total) a partir de la ecuación (7), (8) y (9) [20].

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (I_{h,i})^2} \quad (7)$$

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_{h,1}} \times 100 \text{ [\%]} \quad (8)$$

$$TDD_k = \left[ \frac{1}{I_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,k})^2} \right] \times 100 \text{ [\%]} \quad (9)$$

Donde:

- $I_{h,k}$  es la armónica de corriente  $h$  en el intervalo  $k$  de 10 minutos.
- $I_{h,i}$  es el valor eficaz (*rms*) de la armónica de corriente  $h$  (para  $h = 2,3, \dots, 50$ ), medido cada 3 segundos ( $i = 1,2, \dots, 200$ ).
- $DI_{h,k}$  es el factor de distorsión individual de corriente de la armónica  $h$  (para  $h = 2,3, \dots, 50$ ) en el intervalo  $k$  de 10 minutos.
- $TDD_k$  es el factor de distorsión de demanda total (armónicos de corriente).
- $I_{h,1}$  es el valor eficaz (*rms*) de la componente fundamental de corriente (60 Hz).

Los límites máximos del factor de distorsión armónica individual y total de corriente se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Niveles máximos de distorsión armónica de corriente [20].

Nivel máximo de armónicos impares (% de la corriente máxima de demanda)						
$I_{cc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

## 2.3. Sistemas de Generación de Energía Solar Fotovoltaica

### 2.3.1. Energía solar fotovoltaica

A lo largo de la historia de la humanidad, el hombre ha hecho uso de distintos tipos de energía para su desarrollo. Esta dependencia del uso de energía ha incrementado a mayores escalas, lo que ha llevado al hombre a desarrollar e implementar nuevas tecnologías de energías para el desarrollo de la civilización, como lo es la electricidad. La electricidad es un tipo de energía secundaria; es decir, no se encuentra directamente en la naturaleza, sino que proviene de un proceso de producción a partir de otras fuentes de energía del tipo primarias, la cuales van desde el uso de energías fósiles, tales como el gas natural, el carbón y petróleo; el uso de los recursos hídricos en la implementación de la energía hidráulica; y en las últimas décadas, en el desarrollo de tecnologías catalogadas como energías renovables, ambientalmente seguras y sostenibles. A pesar de que el mundo se encuentre en un desarrollo contante, existen muchas partes en las que no se tiene acceso a la red eléctrica; en estos casos la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es una gran alternativa.

Entre las energías renovables, como una de las más destacadas, se encuentra la energía solar. Este tipo de energía es aquella proveniente del sol, misma que es catalogada como la mayor fuente de energía presente en el universo. Esta energía se emite en forma de ondas electromagnéticas a través de fotones, la más pequeña unidad cuantificable, invisible para el ojo humano [21].

### 2.3.2. Recurso primario – Radiación solar

La energía solar incidente en una superficie determinada en un momento particular se conoce como irradiación solar ( $H$ ), expresada en  $kWh/m^2$ , comúnmente representa el valor promedio diario. La irradiación, sin embargo, depende de muchos factores, tanto ambientales

(condiciones atmosféricas) como geográficas (latitud y longitud), además de los obstáculos presentes en el sitio. Otro parámetro importante para el análisis del recurso solar se conoce como hora solar pico (*HSP*), que se define como la cantidad de horas equivalentes a una irradiancia (*I*) de  $1000 \text{ W/m}^2$  en un día, lo que permite describir la cantidad de energía solar disponible en una determinada área a lo largo del día. Las *HSP* es un parámetro esencial ya que describe la cantidad de energía solar aprovechable en el transcurso del día en una determinada área, perpendicular a la posición del sol [22], [23].

En Ecuador, el valor medio aproximado anual de irradiación solar es de  $4574.99 \text{ Wh/m}^2$  (ver Anexo A) [24], [25], [26], presentando variaciones de un 30% en Ecuador continental y 40% para las islas Galápagos. Dado que la irradiación representa la energía solar recibida en una determinada área y la irradiancia corresponde a la potencia instantánea por unidad de área, para calcular las horas solar pico, se utiliza la relación entre estos parámetros, ver ecuación (10).

$$H \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right] = I \left[ \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right] \times HSP [h] \quad (10)$$

Entonces una irradiación de  $4.574 \text{ kWh/m}^2$ , corresponde a  $4.574 \text{ HSP}$  [24].

### 2.3.3. Componentes principales

#### 2.3.3.1. Panel solar

También conocido como generador fotovoltaico, es el encargado de transformar la energía solar en electricidad (corriente continua), ver Figura 2. Esta transformación tiene lugar en las celdas solares mediante el efecto fotoeléctrico. Un panel solar está conformado por un conjunto de módulos fotovoltaicos (FV) interconectados, mismos que se encuentran constituidos por la agrupación de celdas solares conectadas entre sí; a su vez la interconexión de paneles solares conforma arreglos fotovoltaicos (ver Figura 3), los cuales permiten la generación de grandes cantidades de energía eléctrica, proporcionando las características de tensión y potencia necesarias [21].



Figura 2. Panel fotovoltaico. Fuente: elaboración propia (2025).

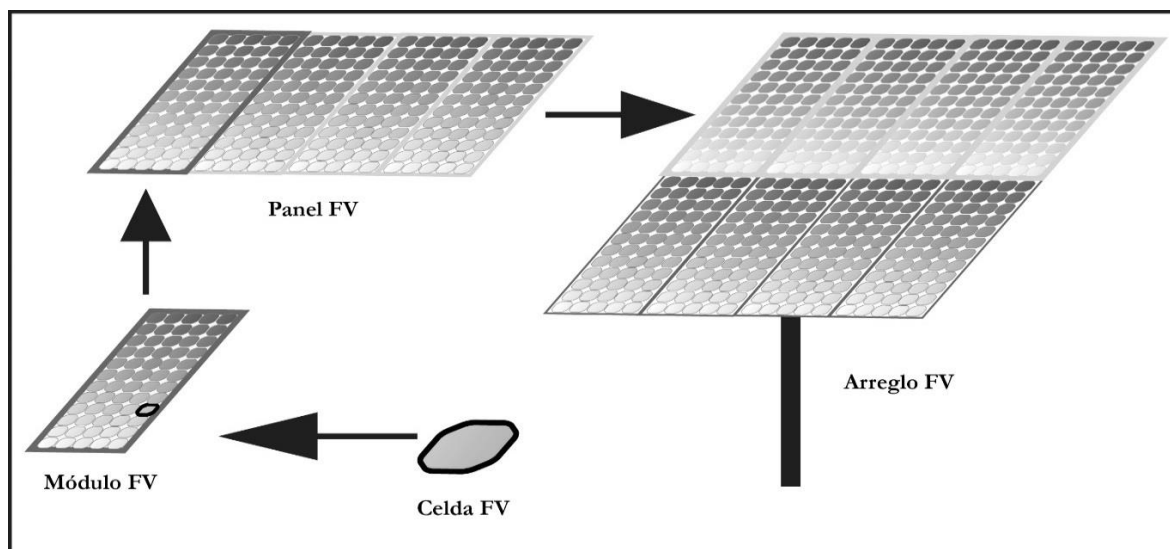


Figura 3. Clasificación de celda, panel y modulo en orden creciente [23].

Para la elaboración de las celdas fotovoltaicas se usan materiales semiconductores como silicio (Si), germanio (Ge), arseniuro de galio (GaAs), entre otros, pero comúnmente se usa silicio y se tienen dos tipos de tecnologías para la elaboración de las celdas, destacadas por su eficiencia de conversión energética, medidas bajo condiciones estándares de masa de aire ( $AM$ , longitud del camino de la radiación solar a través de la atmósfera) de 1.5 ( $1000 W/m^2$ ) a  $25^\circ C$  (según IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global):

- Monocristalino: posee una estructura cristalina uniforme, donde todos los átomos están perfectamente alineados formando un solo cristal. Posee un mayor costo de producción; presenta un rendimiento energético del  $26.7\% \pm 0.5\%$  [27].
- Policristalino: presenta una estructura cristalina ordenada por regiones en la que sus átomos presentan distintas direcciones. Menor costo de producción; presenta un rendimiento energético del  $21.9\% \pm 0.5\%$  [27].

La potencia que pueden entregar un panel FV, depende esencialmente de la radiación solar disponible y condiciones ambientales. Para ello se determinaron parámetros que definen condiciones de ensayo estándar, STC (del inglés, Standard Test Condition) para los paneles fotovoltaicos con el propósito de caracterizar su funcionamiento. Entre los parámetros a considerar se tiene la temperatura de la celda de  $25^{\circ}\text{C}$ , una irradiancia de  $1000\text{ W}/\text{m}^2$  y una masa de aire ( $AM$ ) de 1.5. A partir de estas condiciones se define la potencia característica del panel expresada en Watt Pico ( $Wp$ ), fuera de las condiciones STC el panel puede generar mayor o menor potencia dependiendo de las condiciones ambientales y de la localidad en la que se encuentre instalado [28].

De igual manera, bajo diferentes condiciones de trabajo, cada panel posee una curva característica para su funcionamiento, misma que está en función de la variación del voltaje y la corriente (Curva  $I - V$ ), ver Figura 4. A partir de esta curva se definen parámetros importantes de cada panel fotovoltaico descritos a continuación [28]:

- Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ): indica la máxima corriente que se puede extraer del panel cuando la tensión en bornes es de cero.
- Tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ): indica la máxima tensión que se puede obtener del panel en ausencia de carga eléctrica, es decir, corriente cero.
- Corriente del punto de máxima potencia ( $I_{mp}$ ): indica la corriente que entrega el panel en el punto de trabajo donde se obtiene la máxima potencia.
- Tensión del punto de máxima potencia ( $V_{mp}$ ): indica la tensión que entrega el panel en el punto de trabajo donde se obtiene la máxima potencia.
- Punto de máxima potencia ( $MPPT$  o  $P_{max}$ ): es el lugar geométrico dentro de la curva  $I - V$  en donde se obtiene la máxima potencia del panel. Este es el punto óptimo de trabajo sobre el cual se intenta mantener a los paneles en operación.

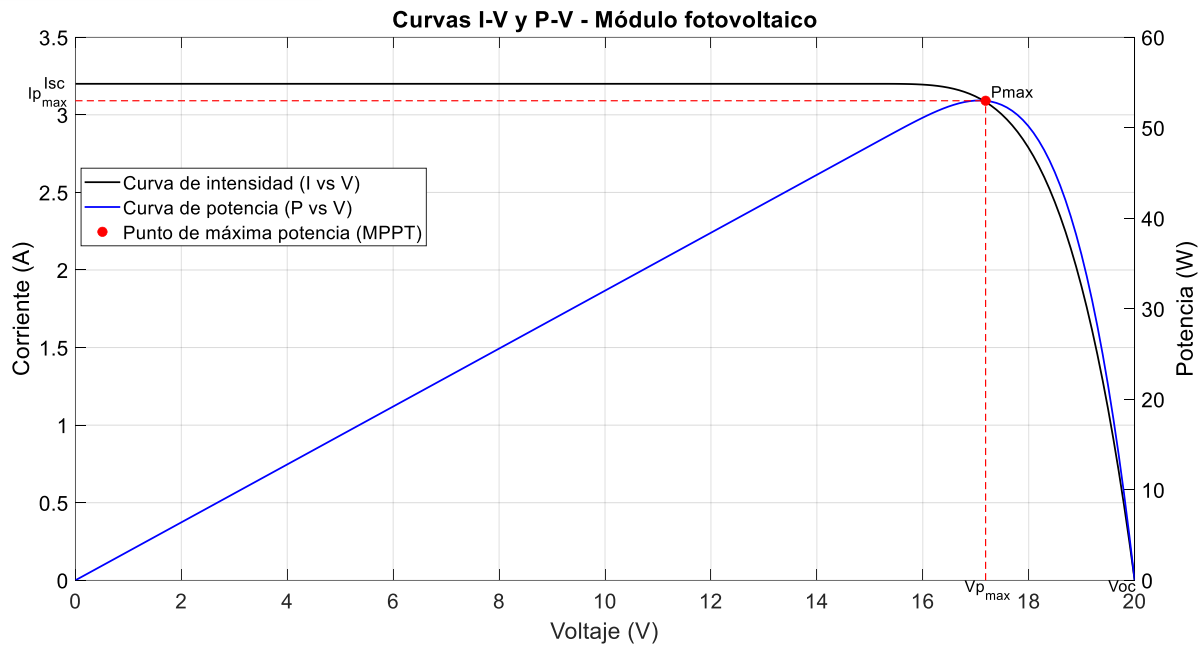


Figura 4. Curva I - V típica de un panel FV. Fuente: elaboración propia (2025).

La potencia máxima viene expresada mediante la ecuación (11):

$$P_{max} = I_{sc} \times V_{oc} \times FF \tag{11}$$

Donde  $FF$  representa el factor de forma presentada en la ecuación (12), es una medida de la eficiencia que un panel para convertir la energía solar en energía eléctrica útil [29].

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \tag{12}$$

- Eficiencia ( $\eta$ ): representa la relación entre la potencia eléctrica obtenida a partir del generador fotovoltaico y la potencia solar incidente, ecuación (13).

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \times P_{sol}} \tag{13}$$

Donde  $P_{sol}$  es la potencia solar incidente por unidad de área (en condiciones estándar  $1000 \text{ W/m}^2$  o  $100 \text{ mW/cm}^2$ ); y  $A$  es el área del panel solar (en  $\text{m}^2$  o  $\text{cm}^2$ ) [29].

Dependiendo de los requerimientos de potencia por parte de las cargas, estas demandarán un mayor o menor nivel tanto de voltaje como de corriente. Obtener estos valores requeridos se consigue con las distintas conexiones entre los paneles fotovoltaicos. Conectar los paneles en serie resulta en la suma de sus tensiones de salida (requerido para alcanzar la tensión mínima de operación del inversor), y al conectar en paralelo se suman sus corrientes (ver

Figura 5). La conexión de varios paneles en serie se lo conocen como ramal o cadena (string); y por último la consecución de un arreglo fotovoltaico se consigue al interconectar varios strings en paralelo [28].

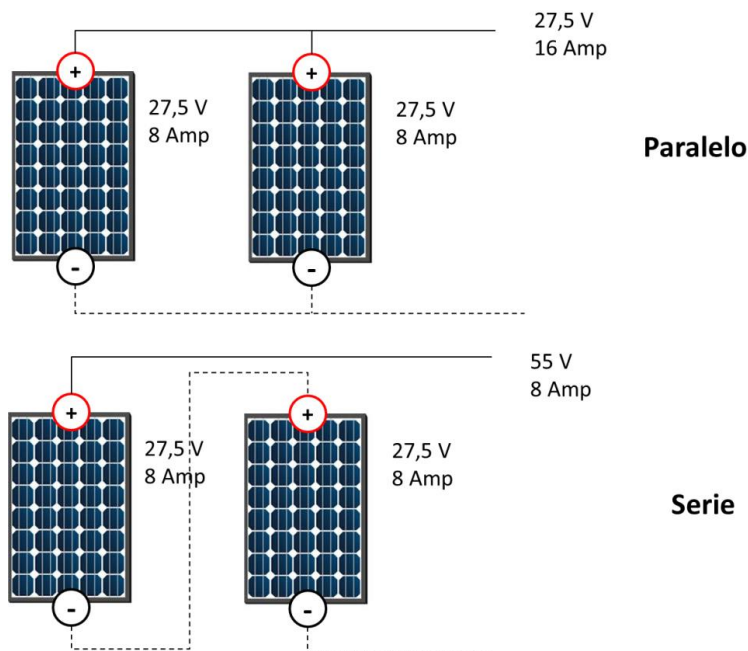


Figura 5. Conexiones entre paneles FV [28].

### 2.3.3.2. Inversores

El inversor (ver Figura 6) es un convertidor de potencia que transforma la corriente continua (DC) producida por los paneles fotovoltaicos en una onda sinusoidal de corriente alterna (AC) para su uso en las cargas conectadas al sistema eléctrico, como se ilustra en la Figura 7, con el nivel de tensión y frecuencia requeridos para cumplir las condiciones de calidad de suministro energético, evitando la distorsión armónica. Deben contar con una alta eficiencia y sistemas de protecciones contra sobrecargas y cortocircuitos; deben estar en la capacidad de admitir demandas instantáneas de potencia mayores a 150% de su potencia nominal [22]. El inversor se conecta a continuación del arreglo fotovoltaico y se encarga de buscar el punto de máxima potencia (*MPPT*) de manera continua a lo largo del día, ajustando la impedancia de carga, para extraer la máxima potencia del sistema, por ende, tener un sistema mucho más eficiente [30].

Con base en su modo de operación, los inversores se dividen en tres categorías, que se listan y explican a continuación [28], [31], [32]:

- Inversores conectados a la red o Grid-connected, el más usado, funcionan como una fuente de corriente, en donde el nivel de tensión y frecuencia dependen del punto de

conexión a la red en la que se encuentre. Trabaja en paralelo a la red, y en ausencia de esta se desconecta automáticamente. A su vez, los inversores conectados a la red se pueden clasificar según su topología (ver Figura 8).



Figura 6. Inversor. Fuente: elaboración propia (2025).

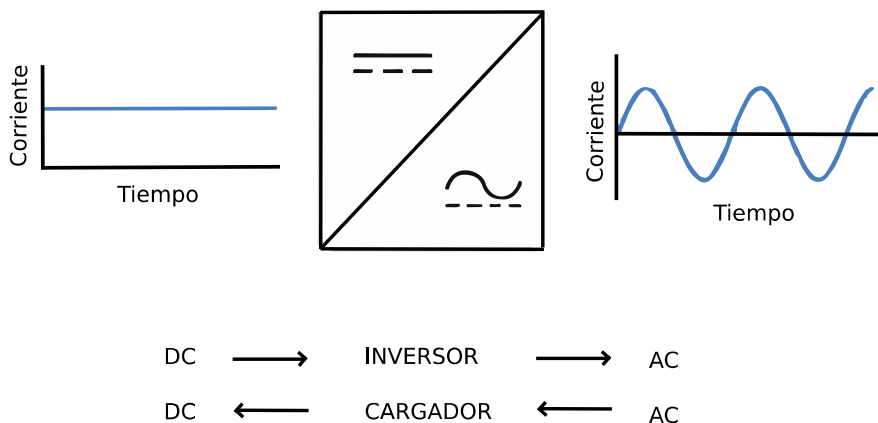


Figura 7. Símbolo del convertidor (inversor) [28].

- Inversores autónomos o Stand-alone, utilizado en zonas donde no se dispone del suministro de energía eléctrica. Están diseñados para suministrar energía a niveles de tensión y frecuencia que se necesite en el sitio, de manera estable y constante a la carga. Lo que les caracteriza es su potencia nominal continua, lo que les permite alimentar a las cargas eléctricas de manera constante.
- Inversores bimodales (híbridos), combinan las funciones de los inversores conectados a la red y los autónomos, permitiendo operar conectado a la red o en modo aislado junto a un sistema de almacenamiento. A pesar de ser menos empleados, son de

mayor costo, pero ofrecen mayor flexibilidad y respaldo ante ausencia del suministro eléctrico.

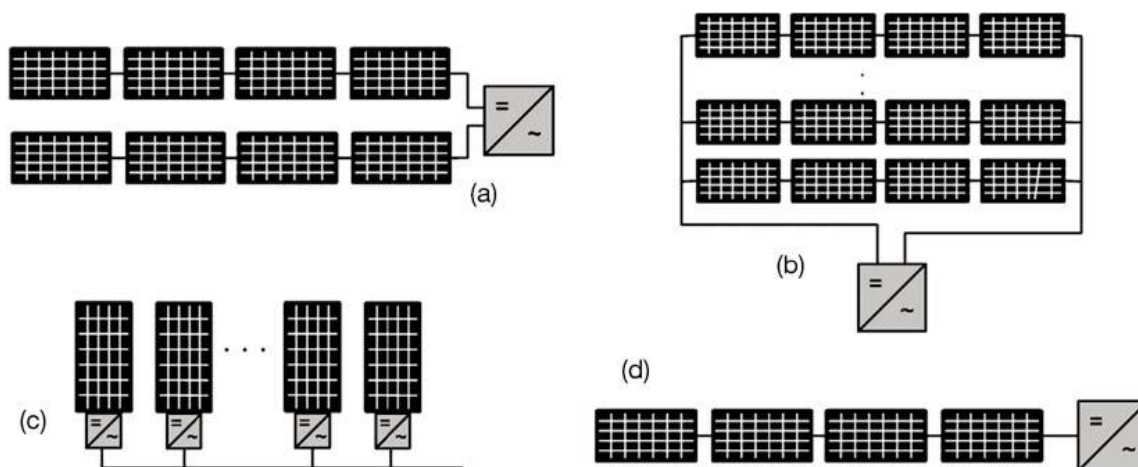


Figura 8. Clasificación de inversores según su topología: (a) inversor multi-string, de entre 1kW a 10 kW de potencia nominal; (b) inversor central, desde varios kW hasta 100 MW; (c) microinversores, de entre 50 W a 500 W de potencia nominal; y (d) inversor string, desde algunos cientos de vatios hasta pocos kW [31].

Además de la potencia nominal y pico, el nivel de tensión y la frecuencia de operación, para la selección del inversor adecuado se debe considerar el tipo de onda que este proporciona, pudiendo ser de onda cuadrada, ideal para sistemas de iluminación; onda cuadrada modificada, el cual puede atender la mayoría de consumos a excepción de dispositivos con electrónica sensible y motores; y onda senoidal pura, el cual puede utilizarse con todo tipo de equipos [28].

### 2.3.3.3. Controlador de carga

Dentro de los sistemas aislados, el controlador de carga (ver Figura 9) es el encargado de estabilizar la tensión y corriente que entregan los paneles solares hacia las baterías, protegiendo el sistema de almacenamiento ante posibles sobrecargas y descargas profundas. Garantiza niveles constantes de tensión y evita el flujo inverso de energía hacia los paneles. Se encarga también de controlar el estado de la batería, regulando la intensidad de carga para prolongar su vida útil [29].

### 2.3.3.4. Estructura de soporte, cableado y protecciones

Dentro del diseño para SFV, el sistema de montaje y el cableado constituyen elementos fundamentales en la instalación de sistemas fotovoltaicos, ya que no solo garantizan la integridad mecánica y eléctrica del sistema, sino que también inciden directamente en su eficiencia, seguridad y durabilidad de la instalación.



Figura 9. Controlador de carga [33].

#### 2.3.3.4.1. Estructura de soporte y disposición del arreglo

Uno de los elementos más importantes en una instalación fotovoltaica, para asegurar un óptimo aprovechamiento de la radiación solar es la estructura de soporte, la cual está encargada de sujetar los módulos solares, proporcionando la inclinación y orientación adecuada (ver Figura 10). Las estructuras de soporte deben ser capaces de resistir mínimo 10 años de exposición a la intemperie sin corrosión o fatiga aplicable; además de soportar vientos de 120 km/h como mínimo. Para las estructuras se debe utilizar materiales como acero inoxidable, aluminio, hierro galvanizado, estructuras de fibra de vidrio. Para la fijación de los módulos fotovoltaicos, se debe utilizar tornillos, tuercas y arandelas de acero inoxidable [29].

En las estructuras de soporte, por lo general, no se disponen de sistemas de seguimiento solar; en ese caso es necesario orientar los paneles de forma que este entregue el mayor rendimiento a lo largo de todo el año. Para ello es necesario determinar el ángulo de inclinación que permita la mayor captación de energía solar durante el peor mes, es decir el mes con la peor relación entre los valores diarios de la irradiación y el consumo. Se recomienda orientarlo de modo que la cara a irradiar vea en sentido contrario al hemisferio en el que se encuentra, con una inclinación ( $\beta$ ) medida en grados, la misma se puede calcular mediante la ecuación (14):

$$\beta = \max\{|\Phi| + 10^\circ\} [^\circ] \quad (14)$$

Donde  $\Phi$  es la latitud del lugar del emplazamiento. Sin embargo, en latitudes cercanas al ecuador, para fines de limpieza y mantenimiento se debe orientarse a  $10^\circ$  respecto a la horizontal. La orientación o azimut ( $\alpha$ ) es el ángulo entre la proyección sobre el plano

horizontal de la normal a la superficie del panel y el meridiano del lugar, para sitios en el hemisferio sur se recomienda un azimut de  $0^\circ$  hacia el norte geográfico.

Para obtener un mejor rendimiento es necesario, además de la inclinación y el azimut, analizar los posibles obstáculos entre el sol y el panel que causarían sombras, es decir, se debe calcular la trayectoria del sol a lo largo del día durante el año [29].

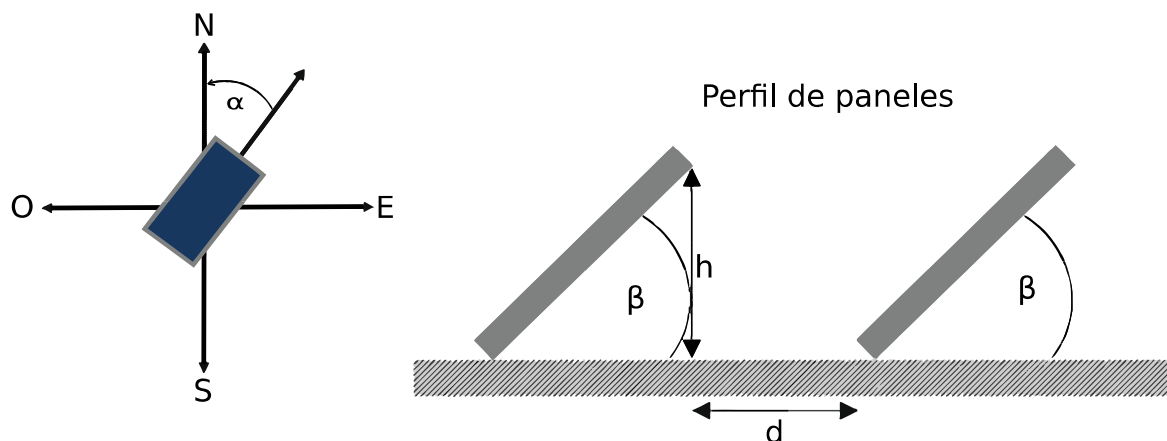


Figura 10. Orientación e inclinación para un panel solar [28].

Cuando el arreglo fotovoltaico es instalado sobre una estructura ya existente con la inclinación adecuada (como en un techo), la posible interferencia entre paneles por sus propias sombras es un factor inexistente; mientras que cuando la superficie del emplazamiento es planar, al montar los módulos fotovoltaicos sobre sus estructuras de soporte, se debe tener en consideración una separación mínima entre filas para evitar las sombras del propio arreglo al menos por cuatro horas de exposición solar al medio día durante las épocas del año de mayor presencia de sombras [34]. Esta separación se determina empleando la ecuación (15).

$$d = \frac{h}{\tan(61^\circ - \text{latitud})} [m] \quad (15)$$

#### 2.3.3.4.2. Cableado del sistema

El cableado del sistema representa un componente indispensable dentro de los SFV para la transmisión de la energía eléctrica producida en los paneles hacia el sistema de almacenamiento y las cargas. Este cableado debe presentar una cobertura de materiales de alta calidad (aislamiento) para que asegure la durabilidad y la fiabilidad del sistema a la intemperie y la humedad, de manera que no le afecten internamente los fenómenos atmosféricos [22].

Entre los materiales empleados se tienen PVC, XLPE (polietileno reticulado) o EPR (caucho etileno-propileno); el primero de estos es típicamente empleado en instalaciones domiciliarias, mientras que los dos siguientes son empleados cuando se necesita de cables subterráneos [28].

Para un óptimo funcionamiento del sistema, se debe calcular la caída de tensión en los cables, mismos que no deben exceder el 1.5% de las tensiones nominales de operación, tanto para corriente continua como alterna. La caída de tensión viene expresada por la ecuación (16).

$$\Delta V = \frac{2 \times I \times \rho \times L}{S} \quad (16)$$

Donde:

- $\Delta V$  es la caída de tensión en  $V$ .
- $I$  es la intensidad de corriente que circulara por el cable en  $A$ .
- $\rho$  es la resistividad del cable en  $\Omega mm^2/m$  (resistividad del cobre  $0.0172 \Omega mm^2/m$ ).
- $L$  es la longitud de cable a usar en  $m$ .
- $S$  es la sección del cable en  $mm^2$

La ecuación (16), se emplea para determinar la sección del cable, en función de la caída de tensión que se desea obtener y la longitud de cable que se empleará. Entonces la sección del cable se calcula con la ecuación (17):

$$S = \frac{2 \times I \times \rho \times L}{\Delta V} \quad (17)$$

Como regla general, si el cálculo de la sección del cable es menor a  $4mm^2$ , se utilizarán cables de  $4mm^2$ ; y si la sección calculada esta entre  $4mm^2$  y  $6mm^2$ , se utilizarán cables de  $6mm^2$  [28].

#### 2.3.3.4.3. Protecciones y puesta a tierra

Las protecciones en un SFV son una parte crucial dentro del sistema ya que evita el daño de los equipos que lo conforman, garantizando la seguridad ante cortocircuitos o sobrecargas y de esta manera prolongar la vida útil del sistema. Se pueden emplear fusibles, portafusibles seccionables, interruptores termomagnéticos e interruptores diferenciales, para seccionar los elementos del sistema tales como:

- Paneles a regulador
- Regulador a baterías
- Regulador a inversor
- Baterías a inversor
- Inversor a cargas.

Además de las protecciones ya mencionadas, se debe proteger al sistema de descargas atmosféricas mediante el uso de pararrayos para prevenir sobretensiones en el sistema. Dentro del sistema de protecciones del sistema, la puesta a tierra es de gran importancia, ya que a este se le conectaran las protecciones de sobretensiones, cortocircuitos y partes metálicas que conforme el SVF. Es recomendable que la puesta a tierra sea independiente a la puesta a tierra de la instalación a servir para que no se transfieran defectos de esta última a la tierra del sistema de generación distribuida [28].

### **2.3.4. Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en baterías**

En los sistemas autónomos que emplean energía solar fotovoltaica, el uso de baterías como sistema de almacenamiento de energía eléctrica es fundamental, siendo el componente encargado de garantizar un suministro energético constante, incluso durante periodos de baja o nula generación [35].

Al ser uno de los componentes más importantes es necesario conocer las diferentes tecnologías, mismas que serán de vital importancia al momento de su aplicación (zonas rurales, instituciones educativas, etc.) ya que presentan propiedades que varían entre los distintos tipos; tales como la eficiencia de la batería, el costo, la vida útil, la profundidad de descarga, entre otros parámetros. A continuación, se describen algunas de las tecnologías más utilizadas de baterías.

#### **2.3.4.1. Plomo-ácido**

Conformadas por un electrodo positivo de dióxido de plomo y un electrodo negativo de plomo esponjoso o poroso, separados por un material microporoso e inmerso en un electrolito acuoso de ácido sulfúrico. Son una buena alternativa dentro de sistemas de almacenamiento energético con una potencia nominal hasta 100 kW; además presentan un bajo costo de adquisición y disponibilidad. Poseen una vida útil más corta que las demás tecnologías y requieren un mantenimiento periódico [36]. Existen dos tipos:

- Baterías de plomo ácido abiertas, FLA (Flooded Lead Acid), mismas que no son aptas para las condiciones de trabajo dentro de sistemas fotovoltaicos, ya que no están

diseñadas para ciclos frecuentes de descarga profunda, lo cual es necesario dentro de los SFV.

- Baterías de plomo ácido selladas, VRLA (Valve Regulated Lead Acid), y se las encuentran en AGM (Absorbent Glass Mat) y Gel; estas tecnologías presentan mayor eficiencia que las FLA (aproximadamente del 86%), acompañado de una profundidad de descarga del 55%; son ideales para la implementación en sistemas fotovoltaicos [23], [37].

#### 2.3.4.2. Iones de litio

Utiliza óxido de metal litificado en los cátodos y carbono grafitico con una estructura en capas en el ánodo. Debido a su alta densidad de energía, eficiencia y vida útil, en la actualidad es una de las más usadas en aplicaciones FV [36]. Entre las tecnologías más usadas están:

- Litio-Ferrofosfato (LiFePO<sub>4</sub> o LFP), ofrece una larga vida útil (más de 4000 ciclos de carga-descarga, con una densidad de energía hasta 160 Wh/kg); ideal para SFV por su alta seguridad gracias a su estabilidad térmica, lo que permite descargas profundas (alrededor del 90%) sin comprometer las condiciones de la batería, con una eficiencia del 97%; y aunque requiere de mayor espacio, no suele ser problema en instalaciones fijas.
- Níquel-Manganeso-Cobalto (NCM), poseen mayor densidad energética que las LFP alrededor de 260 Wh/kg, lo que permite uso de menor espacio y peso, lo que conlleva a que presente mayor potencia nominal; a pesar de tener menos ciclos de carga y descargas que las LFP (entre 1000 y 2000 ciclos), tiene mayor eficiencia y presenta mejores características ante exigencias térmicas, ofreciendo una vida útil más larga en comparación con otros tipos de tecnologías [38], [39].

#### 2.4. Tipos de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos, al aprovechar un recurso técnicamente inagotable, han ganado gran relevancia gracias a su eficiencia y sostenibilidad. Al momento de implementar SFV, existen tres topologías o configuraciones: sistemas conectados a la red (on grid), sistemas aislados (off grid) y sistemas híbridos. Cada uno de ellos presentando características y desafíos particulares en cuanto a la estabilidad de suministro, calidad de energía y almacenamiento [40]. A continuación, se describe brevemente cada tipo de configuración de sistema FV.

### 2.4.1. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Los escenarios de aplicación de sistemas fotovoltaicos son muy amplios y variados. Un sistema FV conectado a la red (on grid) es un sistema compuesto de un arreglo fotovoltaico, un inversor grid connected, sistema de protecciones y un contador bidireccional de energía (ver Figura 11). El propósito de un sistema on grid, por lo general, es amortizar el consumo de energía del usuario proveniente de la red de suministro eléctrico o en su defecto inyectar los excedentes de producción a la red (en algunos países, con fines de comercialización); para este último, el contador bidireccional será el encargado de medir la energía eléctrica vertida a la red para su posterior retribución [41].

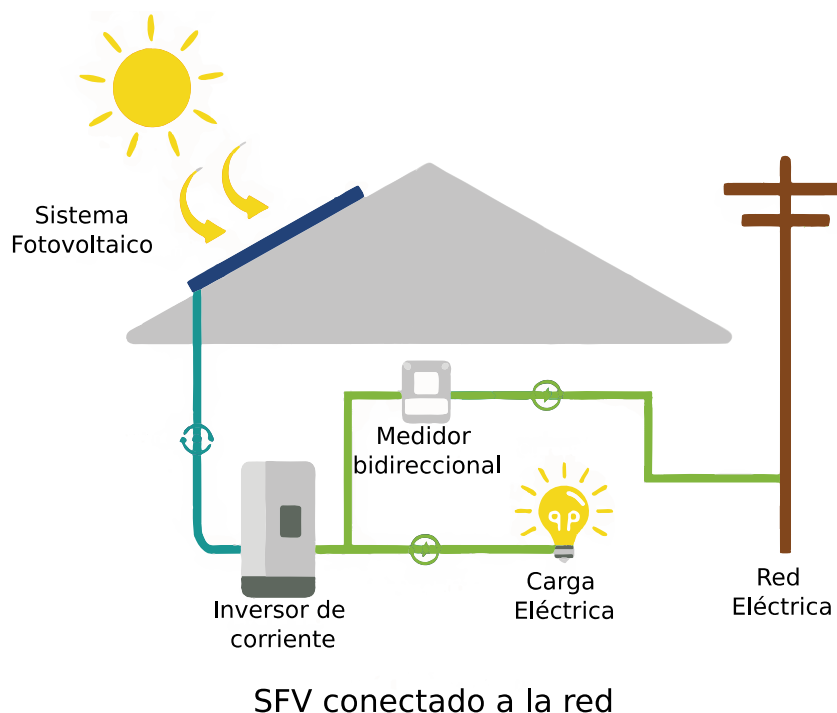


Figura 11. Esquema de un sistema FV conectado a la red [42].

### 2.4.2. Sistemas fotovoltaicos autónomos

Cuando existe la dificultad de disponer del servicio de distribución de energía eléctrica, el uso de sistemas aislados es una gran alternativa para cubrir la demanda de energía. Los sistemas fotovoltaicos aislados (off grid) son sistemas compuestos por un conjunto de paneles solares, el regulador de carga, el inversor tipo stand alone y el sistema de almacenamiento (típicamente, baterías electroquímicas), como se ilustra en la Figura 12. En los sistemas off grid, el almacenamiento es de vital importancia para conservar los excedentes de energía y cubrir la demanda en horas de baja o nula producción. Además, el uso del regulador de carga

permite mantener los niveles óptimos de tensión y corriente para salvaguardar y conservar en las mejores condiciones del resto de componentes del sistema [41].

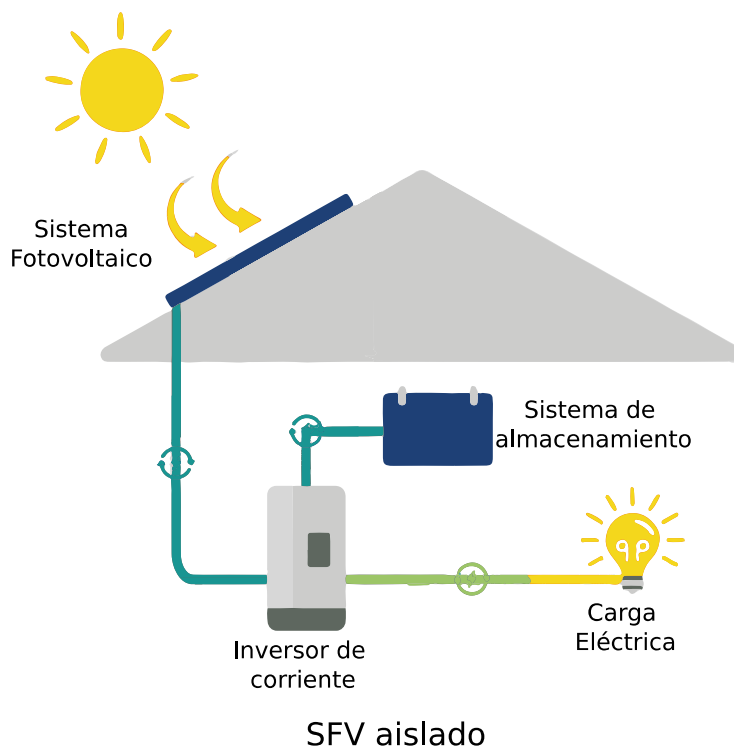


Figura 12. Esquema de un sistema FV aislado [42].

### 2.4.3. Sistemas fotovoltaicos híbridos

Estos sistemas combinan lo mejor de los sistemas on grid y off grid, permitiendo una mayor flexibilidad en la generación y uso de la energía; incorporando sistema de almacenamiento para funcionar en modo isla, y cuando el abastecimiento energético por parte de los paneles fotovoltaicos y baterías no es suficiente, conectarse a la red, asegurando la continuidad del suministro eléctrico (ver Figura 13). En este último caso, también permitiría la inyección de los excedentes de producción a la red. En los sistemas híbridos, el elemento más importante es el inversor del tipo bimodal, el cual permita gestionar de manera inteligente los flujos de energía entre la red, los paneles solares y el sistema de almacenamiento [43].

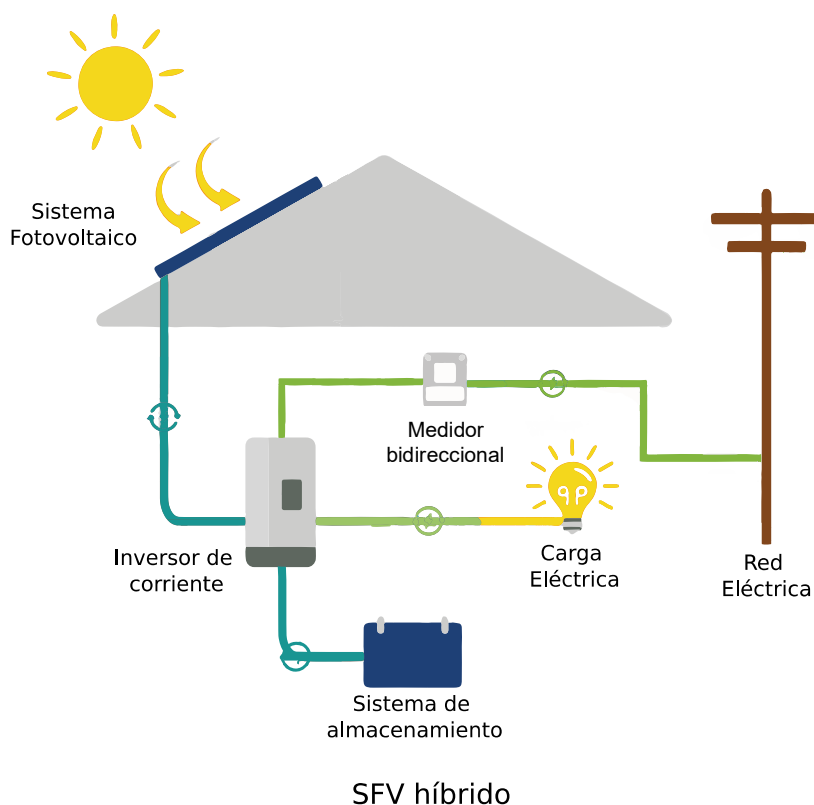


Figura 13. Esquema de un sistema FV híbrido [43].

## 2.5. Diseño de sistemas de Generación de Energía Solar Fotovoltaica con almacenamiento en baterías

Al momento de implementar un sistema fotovoltaico para autoconsumo, su dimensionamiento y diseño juegan un papel primordial. Para este proceso se requiere de la aplicación de conocimientos de ingeniería eléctrica, junto a un riguroso análisis de condiciones climatológicas locales. El objetivo del dimensionamiento es el de garantizar, en condiciones óptimas, el suministro de energía eléctrica de forma confiable y eficiente, priorizando el máximo aprovechamiento del recurso solar para la conversión energética, así como una gestión inteligente para el sistema de almacenamiento, salvaguardando la vida útil de los equipos de la instalación.

Entre los principales procesos dentro del dimensionamiento de un SFV se encuentra el estudio y análisis de las condiciones climáticas del sitio para determinar la disponibilidad del recurso solar, correspondiente a la irradiación, mismo que se traduce en el número de horas solar pico (HSP) disponibles para su aprovechamiento [44]. Paralelamente al estudio del recurso solar, se debe tener en consideración la demanda energética a suplir por el sistema. Este proceso se obtiene mediante campañas de medición con el uso de analizadores de energía, el levantamiento de cargas instaladas (evaluando sus patrones de uso) o mediante

el uso de históricos de consumo; todo esto con el fin de obtener el perfil de carga diaria promedio [45].

Una vez determinada la carga a suplir y el recurso disponible, se seleccionan posibles equipos que conformarán el sistema, para después determinar el número a emplear, tanto para paneles solares como baterías, y si es el caso, el número de inversores a utilizar. Bajo estos cálculos, se consideran factores como el factor de rendimiento, así como también el tiempo de autonomía que se espera para el SFV. Además de lo anteriormente mencionado, se presta atención a la forma de configurar el sistema, sobre todo la disposición de los paneles solares, calculando el número de módulos en serie y en paralelo, la separación entre strings y la óptima inclinación y orientación de estos para un mejor rendimiento del sistema. A continuación, se presentan las principales ecuaciones a utilizar dentro del dimensionamiento de los equipos del SFV con autoabastecimiento [44], [45].

La potencia nominal requerida para el SFV ( $P_{SFV}$ ) se calcula a partir de la ecuación (18):

$$P_{SFV} = \frac{E}{HSP \times PR} \quad (18)$$

Donde:

- $E$  es la energía anual proyectada para el aula prototípica ( $kWh/año$ ).
- $HSP$  representa las horas solares pico promedio del emplazamiento ( $h/año$ ).
- $PR$  es el factor de rendimiento global del sistema (adimensional), 0.90 [45].

A partir de la potencia nominal del sistema, se puede determinar el número de módulos fotovoltaicos a emplear en la instalación mediante la ecuación (19):

$$N_{paneles} = \frac{P_{SFV}}{P_{max-modulo}} \quad (19)$$

Donde  $P_{modulo}$  es la potencia nominal de un módulo fotovoltaico (kWp).

Para el dimensionamiento la potencia del inversor a emplear, se emplea la ecuación (20):

$$P_{inversor} = 1.25 \times P_{SFV} \quad (20)$$

Donde:

- $P_{inversor}$  es la potencia dimensionada para el inversor (kW)
- $P_{SFV}$  es la potencia nominal del sistema fotovoltaico kWp.
- El factor 1.25 representa el valor de holgura por sobrecargas [44].

El dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía en baterías se efectúa considerando la energía promedio diaria requerida para un número definido de horas de autonomía. La capacidad nominal del banco de baterías (Ah) se calcula como se indica en la ecuación (21):

$$C_{banco} = \frac{E_d \times f_H}{V_{banco} \times PdD} \quad (21)$$

Donde:

- $E_d$  es la energía diaria promedio consumida por el aula prototipo. (Wh),
- $f_H$  representa el número de horas de autonomía necesarias respecto al número total de horas en el día (*horas autonomia/24horas*),
- $V_{banco}$  es el voltaje de operación del banco de baterías (V),
- $PdD$  es la profundidad de descarga admisible de la batería (valor adimensional).

Conocida la capacidad del banco de baterías  $C_{banco}$  (o en su defecto, el inmediato comercial superior), el número de baterías a emplear se obtiene mediante la expresión de la ecuación (22):

$$N_{baterias} = \frac{C_{banco}}{C_{bateria}} \quad (22)$$

Donde  $C_{bateria}$  es la capacidad nominal de cada batería Ah.

Finalmente, para determinar el número de paneles en serie (string) y paralelo (número de strings) para la disposición del SFV, se hace uso de la ecuación (23) y (24):

$$N_s = \frac{V_{MPPT-inversor}}{V_{mp}} \quad (23)$$

$$N_p = \frac{N_{modulos}}{N_s} \quad (24)$$

Donde:

- $V_{MPPT-inversor}$  es el voltaje DC a considerar que este dentro del rango de operación MPPT del inversor 120 – 250V
- $V_{mp}$  es el voltaje de máxima potencia en el punto MPPT (voltaje de operación del panel)

La configuración de los módulos se realiza formando strings de módulos conectados en serie, de tal forma que la tensión total del string se ubique dentro del rango de operación del

inversor. Adicionalmente, los strings se conectan en paralelo para alcanzar la corriente total requerida. El dimensionamiento debe garantizar que la tensión máxima del string no supere la tensión máxima de entrada del inversor, y que la corriente combinada no sobrepase la corriente máxima permitida por el dispositivo.

## Metodología

En el presente capítulo se lleva a cabo el desarrollo del diseño del sistema fotovoltaico, el cual parte de una investigación del tipo experimental aplicada, ya que se aborda el dimensionamiento de un prototipo de un sistema fotovoltaico autónomo, validado mediante pruebas en laboratorio para la evaluación de su comportamiento y rendimiento en condiciones controladas con el propósito de resolver problemas de indisponibilidad energética por parte de posibles fallos en el suministro, brindando continuidad del servicio eléctrico.

Partiendo desde la identificación de la ubicación, identificación del recurso solar y las condiciones del emplazamiento, se centra en la obtención, análisis y comparación de datos energéticos (consumo, generación, autonomía y eficiencia), a partir del diseño y dimensionamiento del SFV mediante cálculos matemáticos y el uso de programas, además de la validación del prototipo en el Laboratorio de Micro-Red.

### 3.1. Ubicación y Condiciones del Emplazamiento

#### 3.1.1. Ubicación

El campus Balzay de la Universidad de Cuenca, ubicado en la parroquia de San Joaquín, comprende una extensión de 13.3 hectáreas ubicadas en el límite urbano oeste de la ciudad. Situado entre Av. General Escandón y las calles Víctor Manuel Albornoz y Av. de los Cerezos, alberga a la Facultad de Ciencias Químicas y la Facultad de Ingeniería (ver Figura 14).

El campus georreferenciado con coordenadas  $2.89111^{\circ}$  S,  $79.03761^{\circ}$  W, es el lugar en donde se realizará el estudio y dimensionamiento del sistema fotovoltaico con almacenamiento del aula prototípica.

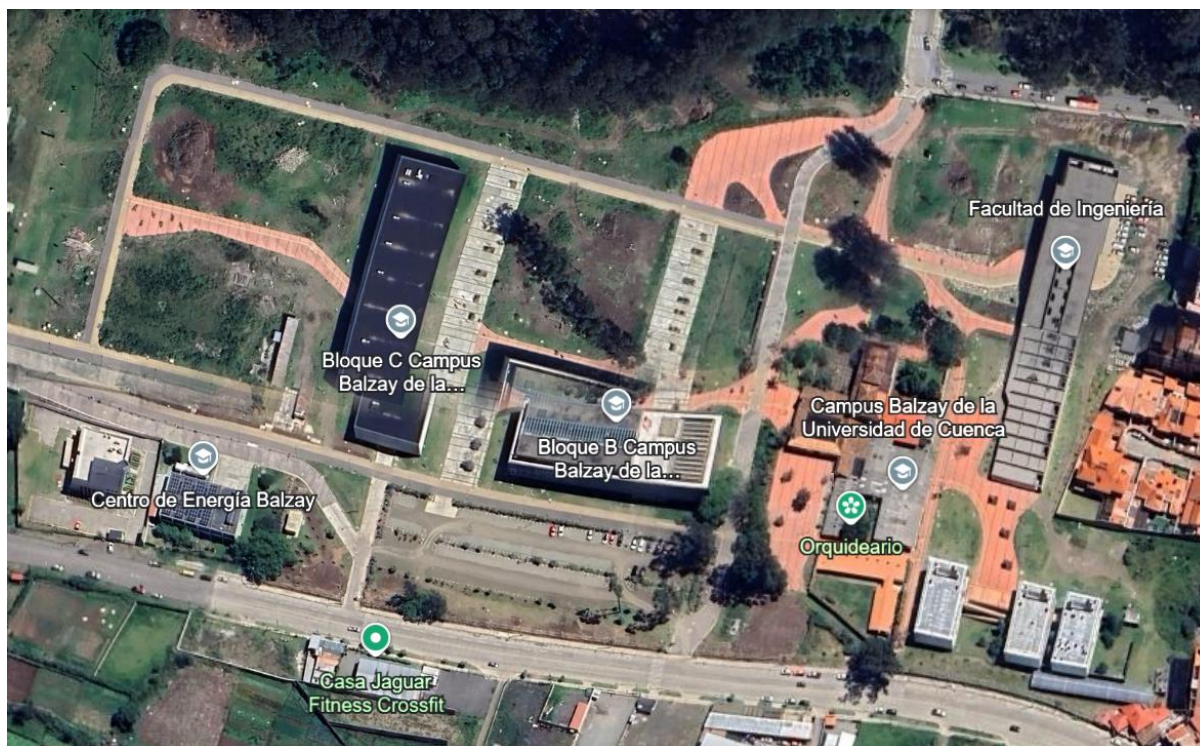


Figura 14. Ubicación del Campus Balzay de la Universidad de Cuenca. Fuente: Google Earth (2025).

### 3.1.2. Recurso solar

Al momento del dimensionamiento para sistemas fotovoltaicos, un parámetro crucial corresponde al recurso solar. Dentro del proceso de diseño de estos sistemas es necesario analizar la disponibilidad de la irradiancia solar en el sitio, ya que esto influye directamente en la cantidad de energía eléctrica que generará el sistema.

Para el desarrollo de este proyecto, se hizo uso de los datos históricos de la estación meteorológica del Laboratorio de Micro-Red de la Universidad de Cuenca, correspondiente a la irradiancia solar. Estos datos fueron registrados durante el año 2023, censados cada 5 minutos. La finalidad de analizar el recurso solar presente en el sitio es comprender los patrones y tendencias de irradiancia solar diaria a lo largo de cada mes.

Al analizar los históricos de irradiancia, se pueden obtener las curvas características por mes durante el año de mediciones (ver Figura 15). A través de estas curvas es posible identificar las tendencias del comportamiento de la irradiancia a lo largo de un día (promedio) para cada mes de año; reflejando una distribución diaria típica, resaltando que la irradiancia comienza alrededor de las seis de la mañana y culmina alrededor de las dieciocho horas, con su pico máximo cerca de las doce horas (medio día), lo cual es lo esperado.

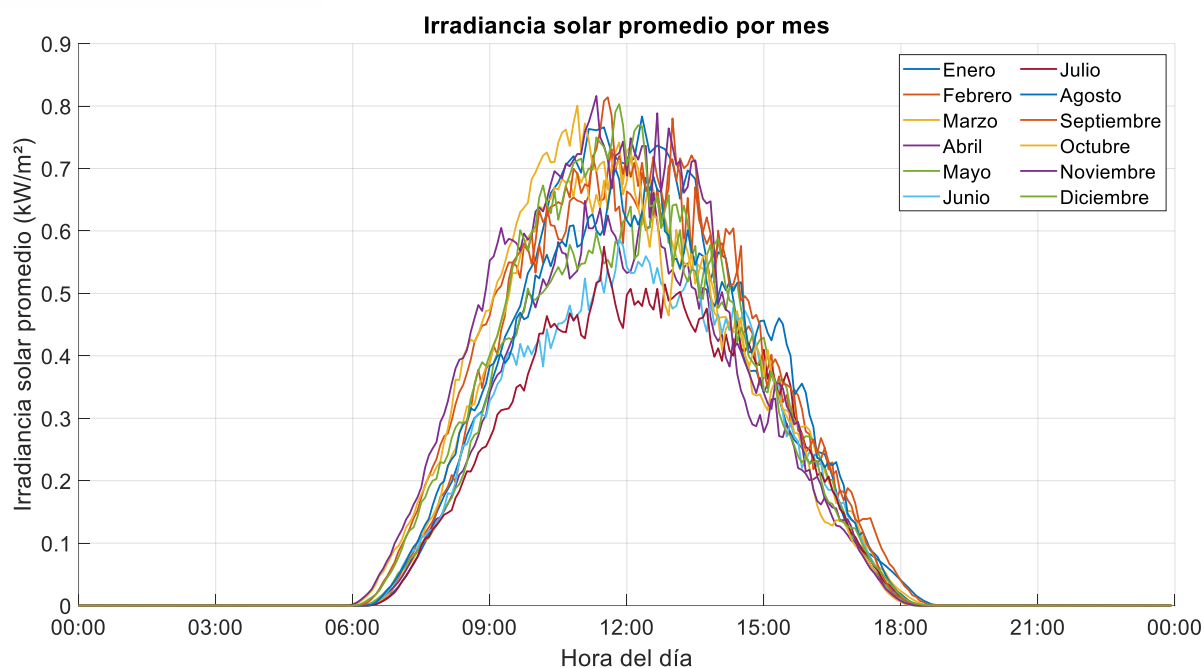


Figura 15. Curvas características de irradiancia solar a partir de mediciones en el Laboratorio de Micro-Red.

Fuente: elaboración propia (2025).

A partir de la irradiancia, se obtiene la irradiación solar, que a su vez es proporcional a las horas solar pico, ecuación (10) de la sección 2.3.2. Recurso primario – Radiación solar. Para determinar este último parámetro, es necesario realizar un procesamiento de los datos históricos de irradiancia por hora para cada día del mes en cuestión; una vez determinado estos valores (promedios por hora del día para cada mes), se procede a sumarlos para así obtener el número de horas solares pico para cada mes. Otra manera de obtener este valor es determinando el área bajo la curva de irradiación solar promedio de cada mes, considerando intervalos de tiempo de una hora.

Este procesamiento de datos permite obtener el número de horas solares disponibles por cada día de cada mes (ver Tabla 5), lo cual es crucial para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el aula prototípica.

Con el objetivo de corroborar la validez de los datos históricos del Laboratorio de Micro-Red, así como verificar la precisión del procesamiento de datos empleada, se ha decidido emplear los datos proporcionados de la National Renewable Energy Laboratory (NREL), el cual es un laboratorio de investigación del gobierno de Estados Unidos, el cual se especializa en la investigación y desarrollo de energías renovables y eficiencia energética [46]. Esta institución, reconocida internacionalmente, cuenta con una amplia base de datos confiables lo cual permitirá establecer una buena base de comparación que respalde la precisión de los datos a usar en el proyecto.

Tabla 5. HSP disponibles por cada día de cada mes a partir de mediciones en el Laboratorio de Micro-Red.  
Fuente: elaboración propia (2025).

Mes	Horas Solares Pico (HSP)
Enero	4.603
Febrero	4.630
Marzo	4.459
Abril	3.811
Mayo	4.114
Junio	3.740
Julio	3.500
Agosto	4.399
Septiembre	4.955
Octubre	4.708
Noviembre	4.977
Diciembre	4.622
<b>Promedio anual [h/día]</b>	<b>4.377</b>
<b>Promedio anual [h/año]</b>	<b>1597.605</b>

La NREL proporciona datos de irradiación solar global presentes en la ciudad de Cuenca, Ecuador; dado que estos valores son directamente proporcionales con las horas solar pico, es posible establecer una correlación técnica entre ambos parámetros, lo que permite realizar el siguiente análisis comparativo de la disponibilidad del recurso solar, ver Tabla 6.

Al comparar los valores de HSP proporcionados por la estación meteorológica del Laboratorio de Micro-Red con los datos de la NREL, se aprecian un importante error entre los meses de abril a julio, aunque este error no representa un mal manejo de los datos en el procesamiento de los mismos, sino más bien podría deberse a un error en las mediciones por parte del NREL, ya que dicho laboratorio obtiene los datos de irradiación solar mediante estimaciones satelitales combinadas con modelos numéricos que integran información de estaciones meteorológicas, topográficas y condiciones atmosféricas locales. En zonas como Cuenca, donde no existen mediciones directas por parte de la NREL, se realiza una extrapolación de datos a partir de datos disponibles de ubicaciones con condiciones geográficas y climáticas similares. A pesar de las irregularidades presentadas anteriormente, para el resto de meses del año se mantienen con un error admisible; y hablando de los valores promedio obtenidos, se presenta un error de alrededor al 4.62%, lo que permite confirmar la veracidad de los datos proporcionados por la estación meteorológica del Laboratorio de Micro-Red.

Tabla 6. Comparativa entre HSP: Laboratorio de Micro-Red vs. NREL. Fuente: elaboración propia (2025).

Mes	Horas Solares Pico (HSP)		Error de precisión [%]
	Laboratorio de Micro-Red	NREL	
Enero	4.603	4.35	5.496
Febrero	4.630	4.41	4.751
Marzo	4.459	4.44	0.426
Abril	3.811	4.75	24.639
Mayo	4.114	4.68	13.757
Junio	3.740	4.74	26.737
Julio	3.500	4.64	32.571
Agosto	4.399	4.58	4.114
Septiembre	4.955	4.58	7.568
Octubre	4.708	4.63	1.656
Noviembre	4.977	4.74	4.761
Diciembre	4.622	4.41	4.586
<b>Promedio anual [h/día]</b>	<b>4.377</b>	<b>4.579</b>	<b>4.615</b>

Además, haciendo uso del mapa de insolación global promedio del Ecuador [26], presentado en el Anexo A, se observa que la zona geográfica correspondiente a la ubicación aproximada del Laboratorio de Micro-Red, dentro del campus Balzay de la Universidad de Cuenca, se encuentra en una región cuya tonalidad de color correspondiente a las curvas de nivel del rango entre 4275 y 4400  $Wh/m^2/día$  (ver Figura 16). Esto confirma que el valor obtenido en el procesamiento de datos del Laboratorio de Micro-Red de 4377  $Wh/m^2/día$  (correspondiente a 4.377 HSP) se encuentra dentro del rango estimado por el mapa, lo cual proporciona una validación adicional para su uso dentro del dimensionamiento del prototipo de aula energéticamente autónoma mediante un sistema solar fotovoltaico para el campus Balzay.

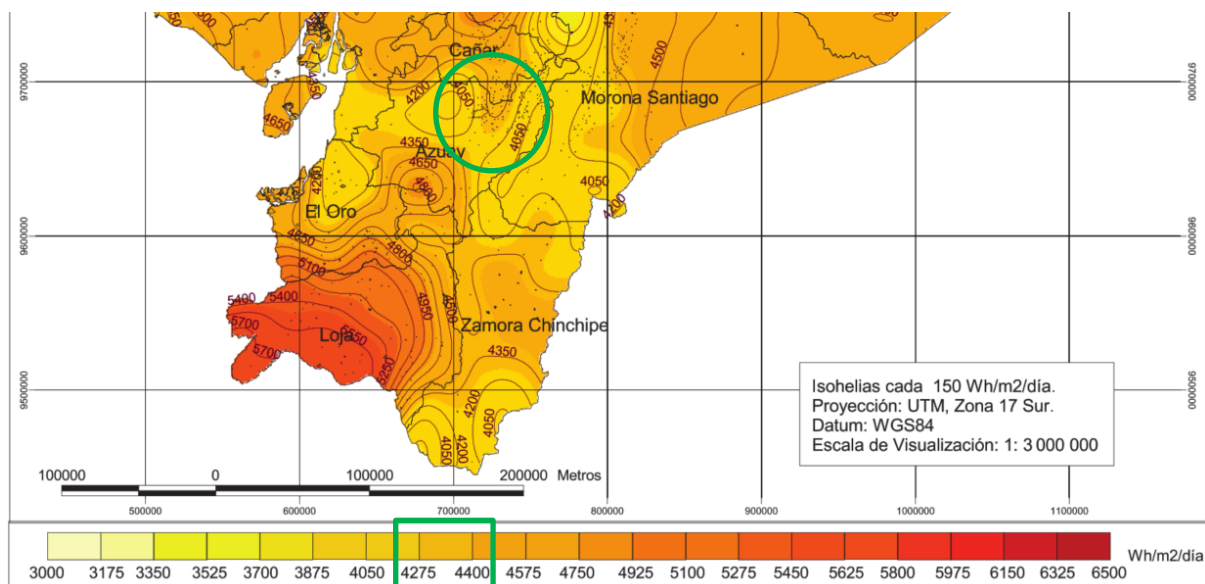


Figura 16. Estimación de HSP a partir del mapa de Insolación global promedio del Ecuador [26].

### 3.2. Elección del aula prototípica

Para la selección del aula prototípica dentro del campus Balzay de la Universidad de Cuenca, se llevó a cabo un proceso de recolección de información en base a criterios técnicos y académicos. En una primera fase, se consultó a docentes y estudiantes del campus con el fin de identificar aulas con alta frecuencia de uso, capacidad adecuada y realización ocasional de actividades extracurriculares. Esta información permitió establecer un primer filtro cualitativo en función de la experiencia directa de los usuarios.

Paralelamente, se solicitó a la administración del campus la identificación de aulas con relevancia institucional y operativa, con el objetivo de limitar la selección a espacios factibles para el desarrollo del estudio. Como resultado de esta etapa, se identificaron las aulas B210 y B310, ubicadas en el bloque B del campus Balzay, como posibles candidatas para el levantamiento de carga para el desarrollo del aula prototipo energéticamente autónoma.

Dado que estas aulas coincidían con los criterios señalados tanto por usuarios como por la administración, se procedió a iniciar el levantamiento del perfil energético de una de ellas. Según lo establecido por la regulación ARCERNR 002/20, la cual define los índices y límites de calidad del servicio de energía eléctrica [20], el levantamiento de carga debe realizarse mediante analizadores de calidad de energía, tales como el Fluke 435-II o el AEMC 8333, disponibles en el Laboratorio de Micro-Red de la Universidad. Esta normativa exige mediciones en intervalos de 10 minutos durante un período mínimo de 7 días continuos.

No obstante, durante la fase de instalación de los equipos de medición, se identificó una limitación importante: los circuitos eléctricos del bloque B no están distribuidos por aulas individuales, sino por plantas completas. Esta configuración impidió la medición directa y exclusiva del consumo energético de las aulas B210 y B310, dificultando así el análisis detallado requerido para el desarrollo del prototipo.

Ante esta dificultad técnica, se consideró como alternativa el uso del aula del Laboratorio de Micro-Red como aula prototípica. Esta aula, además de presentar una alta demanda académica y ser utilizada ocasionalmente para capacitaciones de docentes y personal técnico, cuenta con una ventaja clave: dispone de un tablero de distribución independiente, lo cual facilita significativamente la medición y análisis del perfil energético.

Con el fin de determinar la viabilidad del aula del Laboratorio de Micro-Red como alternativa a las aulas B210 y B310, se llevó a cabo un análisis cuantitativo fundamentado en dos componentes clave: el uso académico semanal y el inventario de cargas eléctricas instaladas en cada aula.

El levantamiento se realizó considerando el número de estudiantes en todos los horarios de lunes a viernes, entre las 07:00 y 19:00, exceptuando el intervalo de 13:00 a 15:00 correspondiente al receso de almuerzo (ver Tabla 7). En cada horario se registró el número de estudiantes presentes, lo que permitió calcular indicadores como la frecuencia de uso, el porcentaje de ocupación, entre otros (ver Tabla 8).

Paralelamente, se efectuó un levantamiento de las cargas eléctricas presentes en cada aula, permitiendo estimar la potencia simultánea demandada en condiciones típicas de operación académica (ver Tabla 9).

Tabla 7. Número de estudiantes de acuerdo al horario de clases académico. Fuente: elaboración propia (2025).

Aula	Horario	Número de estudiantes				
		lunes	martes	miércoles	Jueves	viernes
B210 Capacidad máxima: 86	7 a 9 am	40	50	37	40	50
	9 a 11 am	51	37	35	50	25
	11 a 13 pm	37	24	26	29	35
	13 a 15 pm	0	0	0	0	0
	15 a 17 pm	0	0	0	10	10
	17 a 19 pm	0	0	10	0	0
B310 Capacidad máxima: 86	7 a 9 am	40	40	40	40	40
	9 a 11 am	29	40	51	22	51
	11 a 13 pm	37	50	0	10	40
	13 a 15 pm	0	0	0	0	0
	15 a 17 pm	0	29	5	37	0
	17 a 19 pm	0	0	10	32	0
Lab. Micro-Red Capacidad máxima: 25	7 a 9 am	10	20	15	10	22
	9 a 11 am	22	25	8	25	24
	11 a 13 pm	18	0	18	14	0
	13 a 15 pm	0	0	0	0	0
	15 a 17 pm	0	0	2	0	0
	17 a 19 pm	16	0	8	16	0

Tabla 8. Registro de ocupación semanal de las aulas. Fuente: elaboración propia (2025).

Indicador	Aula B210	Aula B310	Aula Micro-Red
Capacidad máxima	86	86	25
Sesiones de clase disponibles (semanal)	25	25	25
Sesiones de clase usados (semanal)	18	20	16
% de uso semanal	72 %	80 %	64 %
Días con uso	5/5	5/5	5/5
Total de estudiantes (semanal)	596	643	273
Promedio estudiantes/sesión de clase	33	32	17
Ocupación promedio (%)	38.4 %	37.2 %	68.0 %

Tabla 9. Inventario y estimación de carga eléctrica por aula. Fuente: elaboración propia (2025).

Aula	Carga	Cantidad	P. unitaria (W)	Pot. total (W)	Factor de diversificación*	Potencia simultánea (W)
<b>B210</b>	Pantalla OneScreen TL7-86	1	350	350	0.7	245
	Tomacorrientes	10	200	2000	0.35	700
	Luminarias	48	18	864	0.7	604.8
	Proyector Optoma GT5600	1	200	200	0.7	140
	<b>Total</b>	–	–	3414	–	1689.8
<b>B310</b>	Pantalla OneScreen TL7-86	1	350	350	0.7	245
	Tomacorrientes	10	200	2000	0.35	700
	Luminarias	48	18	864	0.7	604.8
	Proyector Optoma GT5600	1	200	200	0.7	140
	<b>Total</b>	–	–	3414	–	1689.8
<b>Micro-Red</b>	Pantalla OneScreen TL7-86	1	350	350	1	350
	Tomacorrientes	5	200	1000	0.35	350
	Luminarias	32	20	640	0.7	448
	<b>Total</b>	–	–	1990	–	1148

**\*Nota:** Los factores de diversificación para los circuitos de tomacorrientes e iluminación usados son los propuestos por la Empresa Eléctrica Centrosur [47]; los factores de diversificación para pantallas y proyectores se establecieron en base a experiencia de uso.

A partir de los datos recopilados, se puede establecer un enfoque integral, combinando datos de ocupación y demanda energética, de esta manera se puede abordar una comparación objetiva entre las tres aulas consideradas, y así sustentar técnicamente la selección del aula prototipo para el desarrollo del presente estudio.

Tabla 10. Comparación final de uso y demanda estimada. Fuente: elaboración propia (2025).

Aula	Pot. simultánea (W)	Ocupación promedio (%)	Demanda estimada por estudiante (W)
B210	1689.8	38.4	51.2
B310	1689.8	37.2	52.8
Micro-Red	1148	68	67.5

El análisis comparativo de ocupación y demanda eléctrica resumido en la Tabla 10, demuestra que se puede seleccionar el aula del Laboratorio de Micro-Red como prototipo para el desarrollo del presente proyecto. A pesar de contar con una carga eléctrica instalada menor que las otras dos aulas evaluadas, su índice de ocupación promedio es significativamente más alto (68.0%), lo que refleja un uso académico más continuo e intensivo.

Asimismo, al relacionar la demanda eléctrica simultánea con la cantidad de estudiantes promedio por sesión de clase, se evidencia que el aula Micro-Red presenta una demanda estimada aproximada por estudiante de 67.5 W, superior a las otras aulas, lo cual indica una mayor carga operativa por usuario promedio. Esta condición es relevante al momento de modelar sistemas energéticos autónomos, ya que permite evaluar escenarios de consumo más exigentes y realistas.

Por ende, atendiendo tanto a la viabilidad técnica de la medición como a la representatividad del uso académico y del perfil de carga eléctrica, se selecciona el aula del Laboratorio de Micro-Red como aula prototipo para el desarrollo del presente proyecto.

### 3.3. Estimación de la demanda energética del aula prototipo.

Para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, es imprescindible la estimación de la demanda con el fin de conocer el comportamiento del aula prototipo. El Laboratorio de Micro-Red dispone de los datos históricos registrados de consumo del aula; a partir de estos, se seleccionaron las mediciones presentes durante la semana del lunes 11 de noviembre del 2024 hasta el domingo 17 con el fin de modelar el comportamiento de la carga para el aula prototípica y determinar el consumo diario existente. A continuación, en la Figura 17 se presenta la curva de perfil de demanda registrada durante el periodo establecido para el levantamiento de información; además en la sesión de anexos se encuentra la curva de demanda correspondiente a cada día (ver Anexo B al Anexo H).

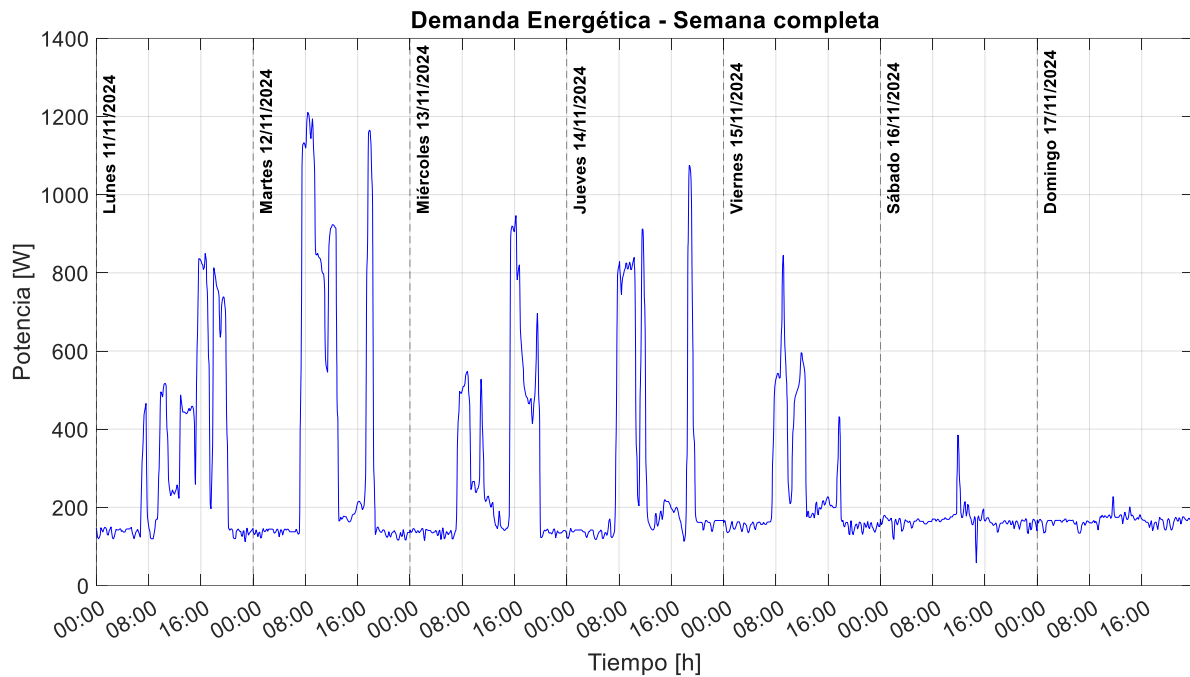


Figura 17. Curva de perfil de demanda del aula prototípica. Fuente: elaboración propia (2025).

Una vez obtenido el perfil de demanda del aula prototipo, se observa que el comportamiento durante los días laborables (lunes a viernes) sigue cierto patrón, presentando sus mayores picos de consumo en horarios correspondientes a los de desarrollo de actividades académicas (desde 07:00 horas hasta alrededor de las 19:00 o 20:00 horas); por otro lado, comparando con los días de fines de semana (sábado y domingo), la demanda se comporta muy por debajo comparada con los días laborables. Para un mejor análisis, se considera obtener una curva promedio de demanda de los días laborales y no laborales (ver Figura 18) para determinar hacer una estimación más global.

Al analizar las curvas de demanda promedio, se observa que el comportamiento del patrón se mantiene respecto a las actividades académicas desarrolladas en el aula prototípica, identificando un pico máximo de consumo promedio de 700W a las 09:00 horas del día.

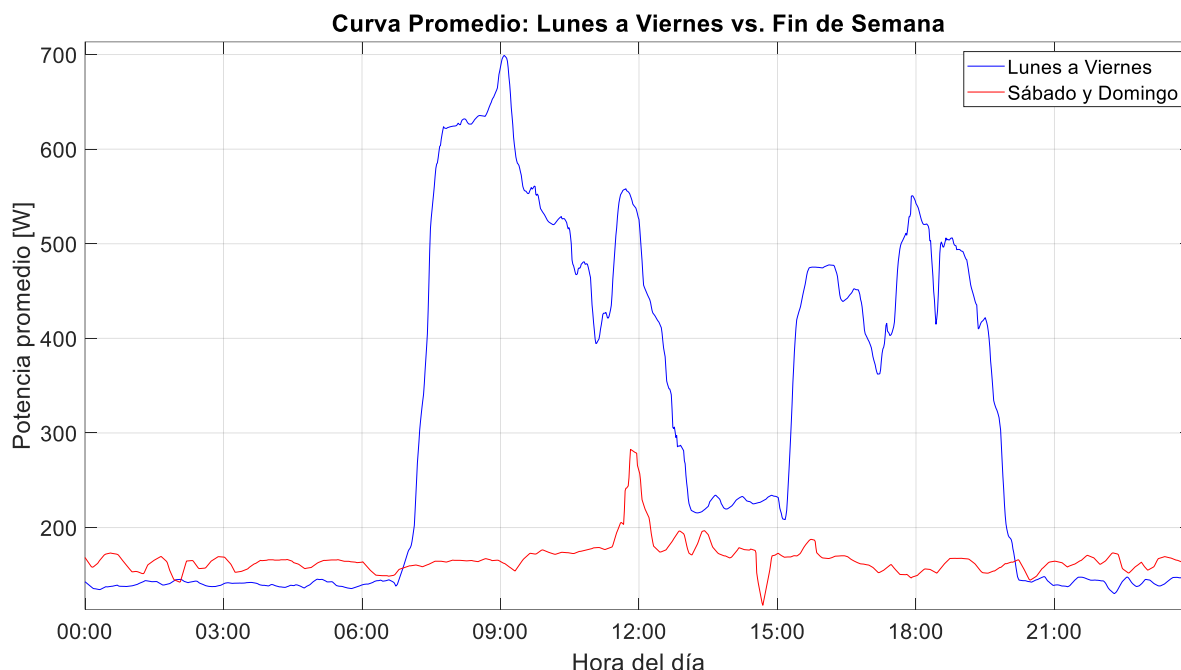


Figura 18. Curva de demanda promedio: días laborales vs. fin de semana. Fuente: elaboración propia (2025).

En términos de energía consumida, en la Tabla 11 se presenta el consumo existente en el aula, presentando la cantidad de *Wh* despachada diariamente, así como los valores promedio para los días laborables y fines de semana. Estos datos promedio permiten estimar el consumo del aula proyectado anualmente, considerando que al año se tienen aproximadamente 52 semanas; de las cuales, días laborables y fines de semana corresponden 260 y 105 días, respectivamente.

Tabla 11. Energía diaria consumida y proyección anual para el aula prototipo. Fuente: elaboración propia (2025).

	Día	Energía consumida [ <i>Wh</i> ]	Energía consumida promedio [ <i>Wh</i> ]
Días laborables	Lunes	7536.405	7222.139
	Martes	8962.794	
	Miércoles	6812.454	
	Jueves	7016.722	
	Viernes	5782.319	
Fin de semana	Sábado	4023.204	3998.416
	Domingo	3973.627	
<b>Demanda anual proyectada para el aula prototipo [<i>kWh</i>]</b>			<b>2293.591</b>

### 3.4. Dimensionamiento y diseño del sistema fotovoltaico

El diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos es un proceso en el cual se requiere la aplicación de criterios de ingeniería y consideraciones climatológicas locales, con la finalidad de garantizar el suministro de energía de manera autónoma y eficiente para el aula prototipo. Tras la caracterización del recurso solar y el perfil de demanda, se considera para el dimensionamiento del sistema proyectado la disponibilidad de los equipos existentes en el Laboratorio de Micro-Red, con los cuales se definen la cantidad de equipos que requiere el prototipo. Una parte importante dentro del dimensionamiento es considerar la configuración para la disposición de los equipos, de manera especial para los módulos fotovoltaicos, teniendo en cuenta la ideal orientación para aprovechar al máximo el recurso solar, consiguiendo así el mejor rendimiento y eficiencia del sistema.

#### 3.4.1. Selección de equipos

Previo al dimensionamiento del SFV con autoabastecimiento para el aula prototípica, se creyó pertinente realizar cotizaciones de equipos disponibles en el mercado ecuatoriano, lo que permitió definir algunos parámetros a considerar dentro del diseño, y sobre todo la compatibilidad de los equipos entre sí. A continuación, se presenta el proceso de selección de los componentes principales para el proyecto.

Dentro del proceso de cotización se tiene como recomendación tener como mínimo tres proveedores con los cuales se puede establecer una comparación entre los productos a considerar, siempre teniendo en cuenta que esta comparación debe realizarse analizando parámetro a parámetro que tengan similares niveles en sus características.

En la Tabla 12 se muestran las opciones de paneles solares junto a las características más importantes de los mismos; los tres proveedores ofrecieron estos paneles con celdas de la tecnología de silicio monocristalino. Evaluando parámetro a parámetro se consideró seleccionar el panel solar VERTEX TSM-DE09R-425, el cual presenta muy buenas características junto a un mejor precio. Este modelo presenta una alta eficiencia y una potencia de salida estable, ideal para sistemas aislados; también se caracteriza por su alto desempeño en condiciones de trabajo de alta o baja temperatura. En el Anexo I se muestra la ficha técnica que presenta todas las características técnicas del modelo seleccionado.

Tabla 12. Principales características eléctricas - Paneles solares. Fuente: elaboración propia (2025).

Parámetro	Marca – Modelo		
	RESUN RS7I-435M	LONGI LR5-54HTH-435M	VERTEX TSM-DE09R-425
Potencia máxima ( $P_{max-modulo}$ )	435 W	435 W	425 W
Tensión de máxima potencia ( $V_{mp}$ )	40.9 V	33.04 V	42.2 V
Corriente de máxima potencia ( $I_{mp}$ )	10.64 A	13.17 A	10.08 A
Tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ )	48.7 V	39.33 V	50.2 V
Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ )	11.39 A	14.22 A	10.61 A
Eficiencia del módulo (%)	19.69 %	22.3 %	21.3 %
Costo	\$140	\$99	\$88.49

Dentro de los equipos empleados en los sistemas fotovoltaicos, el inversor es un elemento indispensable para la conversión de corriente eléctrica de CC a AC. Al igual que en los paneles solares, se procedió a hacer una búsqueda en el mercado ecuatoriano para establecer opciones de inversores que se puedan emplear para el dimensionar del sistema fotovoltaico de interés, pero se tiene que tener en consideración que el inversor a elegir debe contar con el modo de operación híbrido, ya que el sistema para el aula prototipo está pensado para usarse como un sistema de respaldo ante conflictos en el suministro de energía eléctrica por parte de la red pública.

Teniendo en cuenta el modo de operación del sistema, en la Tabla 13 se indican los inversores a considerar para el proyecto junto a sus principales características técnicas. De las opciones mostradas, el inversor elegido fue el GROWATT SPF 3000TL LVM-ES. A pesar de que este inversor sea la opción más costosa económicamente, presenta las mejores características ya que cuenta con una alta eficiencia alrededor del 90%, compatible con baterías de litio; integra el regulador de carga que permite una inteligente gestión del sistema de almacenamiento, maximizando su vida útil; presenta una excelente capacidad de sobrecarga, entre otras características lo cual lo hace adecuado para trabajar en sistemas de respaldo energético. En el Anexo J se encuentra la ficha técnica del inversor seleccionado.

Tabla 13. Principales características eléctricas – Inversores de corriente. Fuente: elaboración propia (2025).

Parámetro	Marca – Modelo		
	GROWATT SPF 3000TL LVM- ES	MUST PV33-3048 TLV	HSI VICTOR NM-ECO- LV3.6KW PLUS
Potencia nominal de salida	3 kW	3 kW	3.6 kW
Potencia máxima de entrada	4 kW	2.5 kW	4.2 kW
Batería / Tecnología	48 VDC / litio-plomo acido	48 VDC / litio-plomo acido	48 VDC / litio-plomo acido
Rango de voltaje MPPT	120 VDC – 250 VDC	60 VDC – 230 VDC	60 VDC – 450 VDC
Voltaje máximo $V_{oc}$ paneles	250 VDC	250 VDC	450 VDC
Corriente máxima MPPT	80 A	80 A	100 A
Numero de MPPTs / Strings	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Eficiencia	90 %	90 %	90 %
Costo	\$793.5	\$743	\$550

Finalmente, para sistemas de respaldo para el autoconsumo de energía eléctrica, la implementación de baterías dentro del SFV es indispensable ya que brinda autonomía energética ante la falta de suministro eléctrico por parte de la red o la insuficiente producción por parte de los paneles solares. En la Tabla 14 se presentan las opciones a considerar en la elección del sistema de almacenamiento de las cuales para este proyecto se ha seleccionado el uso de las baterías DEYE SE-G5.1 PRO-B. Este modelo de baterías se caracteriza por ser modular, permitiendo incrementar la capacidad de almacenamiento según sea necesario; emplea la tecnología de Litio-Ferrofosfato (LiFePO4 o LFP), ofreciendo una máxima seguridad, ciclos de vida útil y alta potencia, ideal para respaldo energético en sistemas aislados e híbridos. En el Anexo K se encuentra la ficha técnica de las baterías seleccionadas para el proyecto.

Tabla 14. Principales características eléctricas - Baterías. Fuente: elaboración propia (2025).

Parámetro	Marca – Modelo		
	GROWATT AXE 5.0L	DEYE SE-G5.1 PRO-B	SUNRAY RACK LITIUM BATTERY
Capacidad de energía	5 kWh	100 Ah	100 Ah
Voltaje nominal	51.2 VDC	51.2 VDC	51.2 VDC
Tecnología de celda	Litio-Ferrofosfato, libre de cobalto	Litio-Ferrofosfato, libre de cobalto	Litio-Ferrofosfato
Ciclos de vida / años	6000 / 10	6000 / 10	6000 / 10
Profundidad de descarga	92 %	90 %	80 %
Corriente de carga - descarga (recomendada / máxima)	60 A	50 A / 100A	50 A / 100A
Costo	\$1899	\$1500.2	\$1621.79

### 3.4.2. Determinación de número de paneles, inversores y baterías

Una vez definidos los posibles equipos a considerar en el dimensionamiento del prototipo, se procede a llevar a cabo la determinación del número de equipos a disponer en el SFV que permitan suplir satisfactoriamente el propósito de este proyecto.

Para determinar la potencia nominal requerida del generador, empleamos la ecuación (18), donde:

- La energía anual proyectada para el aula prototípica,  $E = 2293.591 \text{ kWh/año}$ .
- Las horas solares pico promedio,  $HSP = 1597.605 \text{ h/año}$ .
- El rendimiento global del sistema  $PR = 0.90$ .

$$P_{FV} = \frac{2293.591}{1597.605 \times 0.90} = 1.595 \text{ kWp} \approx 1.6 \text{ kWp}$$

La potencia requerida para este proyecto es de  $1.6 \text{ kWp}$ . A partir de este valor se determina el número de paneles solares a disponer en el sistema empleando la ecuación (19), donde la potencia nominal de un módulo fotovoltaico corresponde al modelo seleccionado VERTEX TSM-DE09R-425,  $P_{max-modulo} = 425 \text{ W}$ .

$$N_{paneles} = \frac{1600}{425} = 3.76 \approx 4 \text{ paneles}$$

Una vez determinado el número de paneles a utilizar en el dimensionamiento, se considera la disposición de los mismos. Para ello se define la cantidad de paneles en serie (string) y en paralelo (número de strings), teniendo muy en cuenta las especificaciones técnicas del inversor, ya que en base a este se debe conseguir los límites de operación del mismo sin sobrepasarlos, y así establecer la disposición de los paneles solares para el arreglo fotovoltaico.

Para la cantidad de paneles por string, ecuación (23), se considera el  $V_{MPPT-inversor}$  el cual define el rango de operación óptima del inversor en el punto de máxima potencia (MPPT), según las especificaciones del inversor seleccionado este rango se encuentra entre  $120V - 250V$ ; para no manejar los cálculos sobre los límites de operación, se define usar un valor medio dentro del rango permitido. El  $V_{mp}$  que es el voltaje de máxima potencia en el punto MPPT, para el modelo de panel solar elegido este valor corresponde a  $42.2V$ .

Pero, teniendo en consideración que se dispone de un máximo de 4 paneles para definir la disposición de los mismos, lo ideal es emplear los 4 conectados en serie, obteniendo un voltaje MPPT de  $168.8V$ , nivel de tensión que está dentro del rango especificado. Además, se debe considerar que el inversor permite una corriente máxima en el punto de máxima potencia de hasta  $80A$ , el panel seleccionado ofrece una corriente MPPT de  $10.08A$  y al disponer de los 4 paneles conectados en serie, esta corriente MPPT se mantiene en el mismo valor. Otro parámetro a tener en cuenta es el nivel de tensión en vacío que soporta el inversor, el cual es de  $250V$ , valor que no es superado por el nivel de tensión en vacío de los paneles conectados en serie ( $200.8V$ ); por lo tanto, con  $N_s = 4$  paneles en string no se infringe ningún límite operativo del inversor.

La cantidad de paneles en paralelo (número de strings) depende de la relación entre el total de paneles del sistema y los paneles en serie, como se lo indica la ecuación (24):

$$N_p = \frac{4}{4} = 1 \text{ string}$$

En lo referente al inversor, a pesar de que ya se definió el uso del modelo GROWATT SPF 3000TL LVM-ES, se puede determinar la potencia necesaria de este para suplir la carga del aula prototípica empleando la ecuación (20), en donde se tienen presente la potencia del sistema multiplicada con un factor de holgura o de seguridad de 1.25 con el fin de prolongar la vida útil, evitar posibles sobrecargas y absorber correctamente los picos de producción solar. Bajo esta consideración la potencia del inversor ideal para el sistema sería:

$$P_{inversor} = 1.25 \times 1.6kW = 2kW$$

Se necesita un inversor de  $2kW$  para el proyecto, sin embargo, la elección previa del inversor GROWATT SPF 3000TL LVM-ES ( $3kW$ ) se considera como la mejor opción, ya que en el mercado ecuatoriano no se disponen de inversores de la capacidad calculada.

Para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía en baterías, se emplea la ecuación (21), la cual considera la energía promedio demandada por el aula prototípica, multiplicada por la fracción del día correspondiente al tiempo de autonomía requerido. Dado que el sistema está concebido como una solución de respaldo ante cortes de energía eléctrica, se toma como referencia la última crisis energética que afectó al país en 2024, durante la cual se implementaron racionamientos de hasta 14 horas diarias [12]. Esta situación impactó de manera significativa al sector educativo, impidiendo el desarrollo normal de las actividades académicas. En este contexto, y con base en el análisis de carga realizado para caracterizar el consumo energético del aula prototípica, se determinó que el requerimiento energético corresponde a 12 horas diarias de operación (desde las 07:00 hasta las 19:00). Considerando este como el peor escenario posible, se establece una fracción del día de 0.5 para definir la autonomía requerida del sistema de almacenamiento.

Para el cálculo de la capacidad de almacenamiento del sistema, también involucra el nivel de tensión y la profundidad de descarga de las baterías a seleccionadas (DEYE SE-G5.1 PRO-B, compatible con el inversor seleccionado), cuyos valores corresponden a 51.2V y 90% respectivamente, obteniendo la capacidad necesaria de almacenamiento de:

$$C_{banco} = \frac{7222.139 \times 0.5}{51.2 \times 0.9} = 78.36 Ah$$

De igual manera que en el inversor, para el banco de baterías se propone establecer una holgura de seguridad ante incrementos de cargas o en su defecto, el aumento de horas de autonomía, considerando un 1.25 para este factor, la capacidad del banco de baterías corresponde a  $97.95 Ah \approx 100 Ah$  ( $5.12 kWh$ ), lo cual es el valor de la batería seleccionada.

Por otro lado, el cálculo de cables en un SFV, según el artículo 690. NEC-NOM de los Estados Unidos, establece que el tamaño del conductor en un sistema fotovoltaico debe ser dimensionado para una corriente continua no menor al 125% de la corriente máxima esperada ( $I_{sc}$ ) del circuito fotovoltaico [48]. Para el tamaño de los conductores para el tramo comprendido entre el inversor y las cargas (tablero de distribución), la NEC 215-2 (A)(1) establece que el tamaño mínimo de los conductores debe ser dimensionado para una corriente no menor al 125% de la corriente nominal de salida del inversor [49]. En función de estas corrientes se determina el calibre del conductor a usar, basándose la tabla del Anexo

L. Finalmente, para el tramo comprendido entre el inversor y el medidor de energía, la NEC-SB-IE (Norma Ecuatoriana de Construcción, capítulo de Instalaciones Eléctricas) recomienda utilizar conductores Nro. 6 AWG, tipo THHN [50].

En cuanto a la capacidad de protección, la NEC Ecuatoriana establece la capacidad máxima del interruptor, en amperios, en función del calibre del conductor implementado (ver Anexo M). De este modo, el calibre de los conductores y la capacidad del interruptor a implementar en el sistema prototípico se resume en la Tabla 15.

*Tabla 15. Calibre de conductores y Capacidad de interruptores para el SFV propuesto. Fuente: elaboración propia (2025).*

Tramo	Corriente (A)	Corriente de diseño (125%) (A)	Calibre del conductor (AWG)	Capacidad del interruptor (A)
Arreglo FV – inversor	$I_{sc} = 10.61$	13.26*	12	20
Inversor – cargas	$I_n = \frac{3000W}{127V} = 23.62$	29.52	10	32
Inversor – Medidor	–	–	6	50

**\*Nota:** en el apartado 2.3.3.4.2. **Cableado del sistema** se indica que, si la sección del cable es menor a  $4mm^2$ , se utilizarán cables de  $4mm^2$ .

Finalmente, como parte del dimensionamiento del SFV para el aula prototipo (ver Figura 19), se determinará la energía anual que producirá el sistema junto a su factor de planta, permitiendo visualizar la cantidad de energía que produce el SFV, así como evaluar el grado del aprovechamiento de la capacidad instalada en relación a la energía anual producida. A través de las ecuaciones (25) y (26) se determinan estos parámetros.

$$E_g = P_{instalada} \times HSP \times PR \tag{25}$$

$$FP = \frac{E_g}{P_{instalada} \times 8760} \tag{26}$$

Donde:

- $E_g$  es la energía anual generada por el SFV en un año (kWh).
- $P_{instalada}$  es la potencia instalada en paneles (kW).
- $FP$  es el factor de planta del sistema (%).
- 8760 son el número de horas en un año.

$$E_g = N_{paneles} \times P_{panel} \times HSP \times PR$$

$$E_g = 4 \times 0.425 \times 1597.605 \times 0.9$$

$$E_g = 2444.33 \text{ kWh/año}$$

$$FP = \frac{2444.33}{1.7 \times 8760} \times 100\%$$

$$FP = 16.413 \%$$

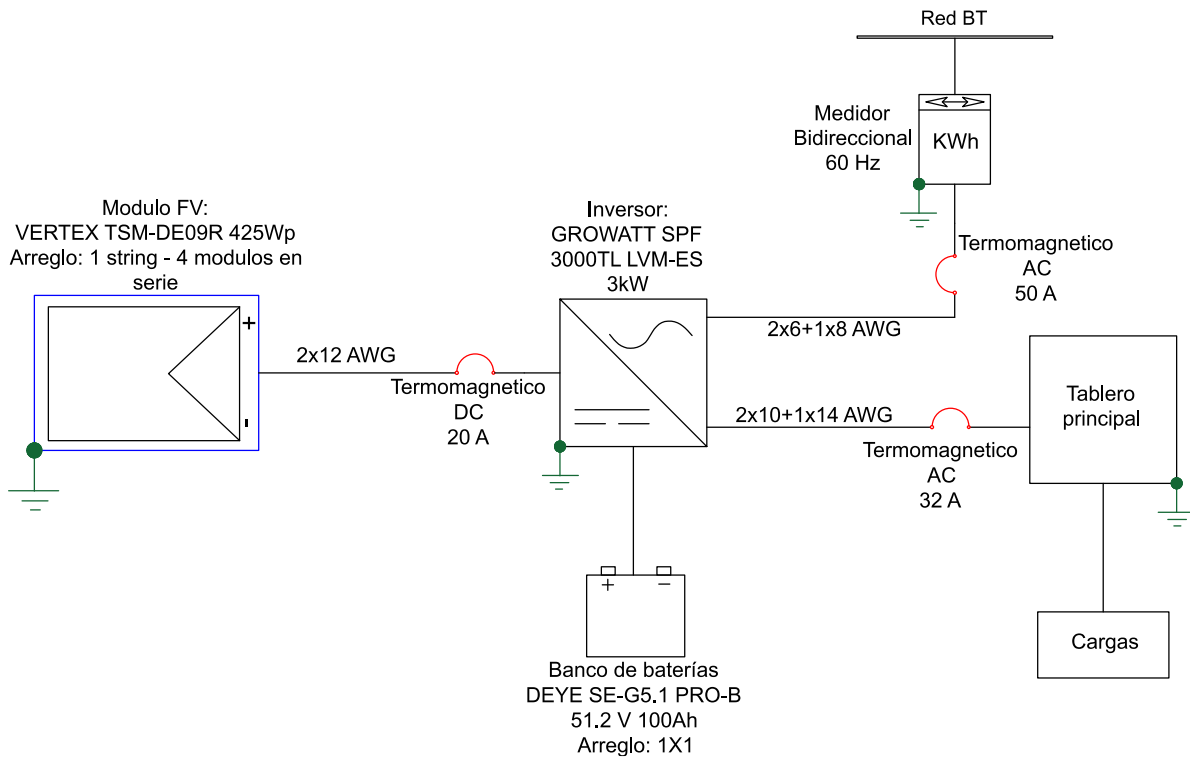


Figura 19. Diagrama unifilar del SFV para el aula prototipo con almacenamiento en baterías. Fuente: elaboración propia (2025).

### 3.4.3. Configuración del sistema

Una vez definido todos los equipos a implementar para el dimensionamiento del prototipo del aula energéticamente autónoma seleccionada, se procede a definir la configuración que tendrá el sistema en el sitio proyectado. Para el prototipo se considera usar uno de los edificios del campus Balzay, los cuales cuentan con una amplia superficie para incorporar el sistema, sin embargo, se lo debe ubicar cerca del aula prototipo establecida para el estudio. En ese caso, la edificación del Laboratorio de Micro-Red también cuenta con un área un poco más limitada en su techumbre para albergar el sistema proyectado debido a la presencia de otros arreglos fotovoltaicos, pero al solo emplear 4 paneles únicamente se necesita de un área mucho más pequeña.



Figura 20. Disposición de arreglos fotovoltaicos existentes en el Laboratorio de Micro-Red [51].

En la Figura 20 se puede observar la disposición de los arreglos fotovoltaicos existentes en la techumbre del Laboratorio de Micro-Red. Para emplazar los paneles solares del sistema para el aula prototipo, se podría hacer uso de los espacios disponibles, siempre y cuando se logre un asentamiento óptimo en donde no haya la interferencia de sombras por parte de las otras estructuras presentes y que permita el fácil acceso del personal para el mantenimiento de los paneles solares. Otra alternativa puede ser la de hacer uso de la estructura del sistema de seguimiento fotovoltaico unidimensional, ya que cuenta con un espacio considerable en el sistema de soporte, la cual sería aprovechada al emplazar el arreglo FV para el aula prototípica. Como una última alternativa, se podría contemplar la opción de sustituir alguno de los strings existentes, lo cual implicaría una futura modernización para la tecnología de los paneles solares policristalinos del laboratorio de Micro-Red.

El área a utilizar para emplazar los paneles fotovoltaicos se determinará usando la ecuación (27):

$$A_T = A_{panel} \times N_{paneles} \quad (27)$$
$$A_T = 1.134 \text{ m} \times 1.762 \text{ m} \times 4$$
$$A_T = 7.99 \text{ m}^2 \approx 8 \text{ m}^2$$

Una vez definido el área necesaria para la adecuación del arreglo fotovoltaico, es necesario establecer una configuración óptima en el posicionamiento de los paneles, esto involucra establecer la orientación y la inclinación adecuada. En general, para maximizar la producción anual, se recomienda una inclinación equivalente a la latitud del sitio, ver ecuación (14). Sin embargo, al estar en el ecuador del planeta, exactamente a una latitud de  $2.89111^{\circ}S$  no sería necesario inclinar los paneles solares para obtener una mejor captación del recurso solar; pero, por fines de mantenimiento y limpieza, se recomienda establecer una inclinación de  $10^{\circ}$  con una orientación o azimut de  $0^{\circ}$ , es decir, que la superficie de los paneles apunten hacia el hemisferio norte del planeta.

Por otro lado, con fines de evitar la interferencia entre un panel con otro por medio de la creación de sombras, se recomienda establecer una separación entre *paneles* la cual está determinada por la ecuación (15):

$$d = \frac{1.134}{\tan(61^{\circ} - 2.891)} \approx 0.7 \text{ m}$$

### 3.5. Simulación del sistema fotovoltaico

Con el fin de complementar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico propuesto para autoconsumo y almacenamiento en baterías para el aula prototípica en el campus Balzay de la Universidad de Cuenca, validar y contrastar su desempeño frente al perfil de carga estimado, se llevó a cabo una simulación en el software PVsyst, el cual es una herramienta ampliamente reconocida en el ámbito del dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos por su capacidad de modelar SVF considerando tanto factores técnicos como climatológicos locales.

El sistema que se modeló corresponde a una configuración híbrida sin inyección a la red, lo que resulta en un sistema de respaldo energético ante posibles racionamientos de energía eléctrica, considerando un tiempo de autonomía de 12 horas, teniendo como prioridad cubrir el intervalo de 07:00 a 19:00 horas, periodo estimado del comportamiento visto durante los días laborables en el perfil de carga del aula prototipo (ver Figura 18). A pesar de tener conocimiento de que el perfil de carga se reduce significativamente durante periodos intersemestrales, en la simulación se optó por utilizar una carga constante la cual representa la energía necesaria a satisfacer anualmente ( $2293.591 \text{ kWh}$ ), ver Figura 21.

The screenshot displays the configuration interface for a PV system simulation. It is divided into several sections:

- Tipo de perfil de carga:** A list of radio buttons for selecting the load profile type. The selected option is "Consumo constante fijo". Other options include "Carga ilimitada (red)", "Valores mensuales", "Perfiles diarios", "Perfiles de probabilidad", "Consumidores domésticos", and "Cargar valores de un archivo CSV por hora/diario".
- Consumo constante fijo:** A section for setting the constant load. It includes a text input field with the value "2293.59" and three radio buttons for units: "kW", "kWh/año" (selected), and "MWh/año".
- Info sistema: Generador FV definido:** A summary box showing system parameters:
 

Potencia FV nominal	<b>1700</b> Wp
Rendimiento estimado del sistema	<b>2056</b> kWh/año
P <sub>nomFV</sub> / PCarga promedio	<b>6.49</b> Proporción P <sub>nom</sub>
P <sub>nomFV</sub> / PCarga máx.	<b>6.49</b> Proporción P <sub>nom</sub>

Figura 21. Configuración de la demanda para la simulación en PVsyst.

Para la simulación se introdujo la ubicación geográfica del campus Balzay de la Universidad de Cuenca, a partir de allí el programa extrajo los datos del recurso solar de la base de datos de la NSRDB (National Solar Radiation Database) TMY (1998-2020), ver Anexo N. Para la configuración del sistema fotovoltaico en el programa, se seleccionaron equipos los cuales presentan características muy similares a los implementados en los cálculos (ver Figura 22, Figura 23 y Figura 24), destacando los siguientes parámetros:

- Potencia del SFV: 1700 Wp (4 módulos en serie de 425 W).
- Orientación / inclinación de paneles solares:  $azimut = 0^\circ$  /  $inclinacion = 10^\circ$ .
- Perfil de carga: 262 W constantes (2294 kWh/año).
- Almacenamiento: 1 batería de ion litio LFP, 51.2 V y 100 Ah, con una profundidad de descarga  $PdD = 90\%$ .

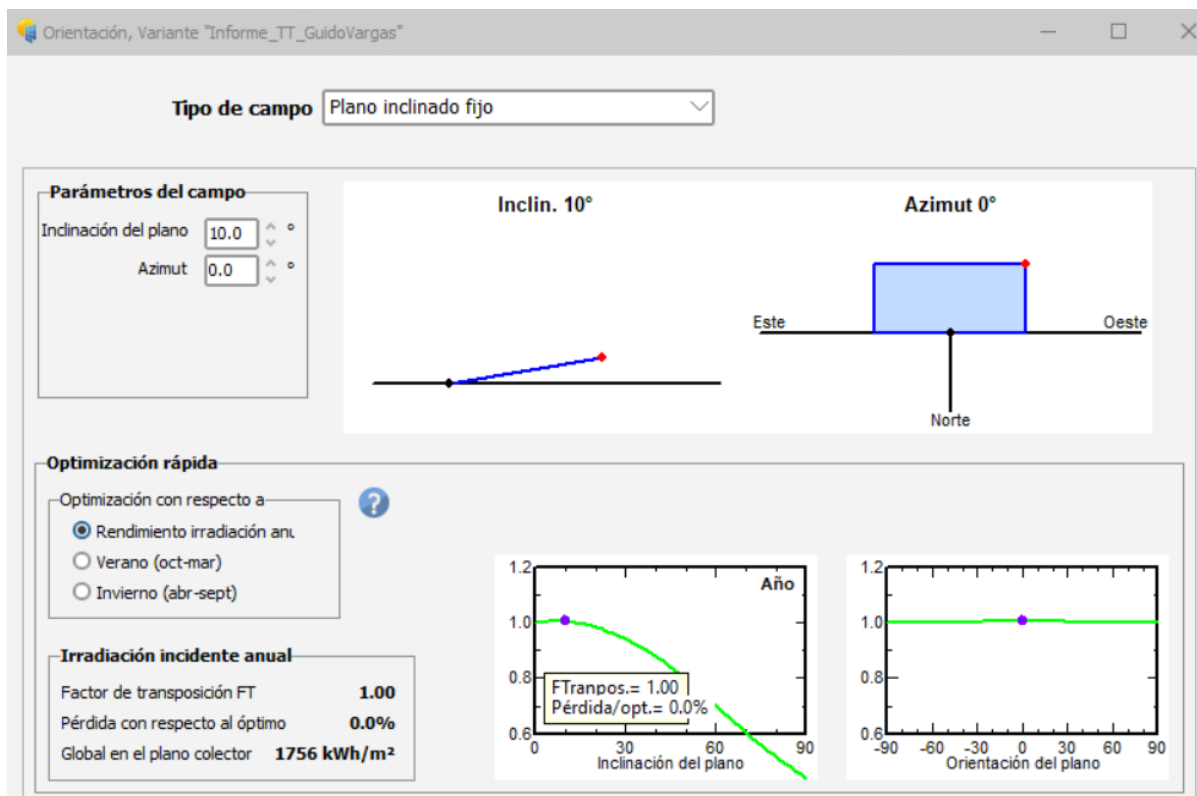


Figura 22. Configuración de la orientación e inclinación para la simulación en PVsyst.

Si bien la carga modela un consumo constante a lo largo del año, esta representa un valor promedio que permite evaluar la capacidad general del sistema bajo condiciones operativas regulares; esto permite realizar un análisis del comportamiento del sistema en condiciones de alta demanda. Al ejecutar la simulación en PVsyst, se destacan los siguientes resultados:

- El sistema es capaz de producir 2513.6 kWh/año, de los cuales la energía utilizable por el sistema corresponde a 1956.88 kWh/año, lo que representa una cobertura del 85.36% de la demanda total simulada.
- Se observó una falta de energía equivalente a 336.71 kWh/año (lo que representa el 14.6% de la demanda anual simulada), atribuida a periodos en donde la radiación solar no permitió cubrir la carga ni mantener la batería correctamente cargada. Además, se registró un excedente de 479.02 kWh/año, correspondiente a energía generada que no pudo ser aprovechada por encontrarse la batería completamente cargada y al no existir consumo adicional en ese momento.
- El sistema mostró un rendimiento general del 66.1%, valor razonable para sistemas en climas cálidos con alta irradiancia, donde las pérdidas por temperatura son considerables. En la Figura 25 se detalla el flujo energético desde la irradiación global

hasta la energía útil entregada, incluyendo pérdidas térmicas (-5.77%), por desajuste de módulos (-2%) y pérdidas por batería llena (-18.36%).

**Definición de un módulo FV**

Datos básicos | Tamaños y tecnología | Parámetros del modelo | Datos adicionales | Comercial | Gráficos

Modelo: Mono 425[Wp 72 cells]      Fabricante: Generic  
 Nombre de archivo: Generic\_Mono\_425W.PAN      Fuente datos: Typical  
 Definición de parámetros personalizados      Prod. desde 2020

Potencia nom. (en STC): 425.0 Wp      Tol. +/-: 0.0 1.5 %  
 Tecnología: Si-mono

**Especificaciones del fabricante o otras medidas**

Condiciones de referencia	GRef	1000	W/m <sup>2</sup>	TRef	25	°C
Corriente de cortocircuito	Isc	10.610	A	Circuito abierto Voc	50.20	V
Punto de Potencia máx.	Imp	10.080	A	Vmpp	42.20	V
Coeficiente de temperatura	muIsc	6.7	mA/°C	Núm células en serie	72	en serie
	o muIsc	0.063	%/°C			

**Herramienta de resultado del modelo interno**

Condiciones de operación	GOper	1000	W/m <sup>2</sup>	TOper	25	°C
Punto de Potencia máx.	Pmpp	425.4	W	Coef. temper.	-0.36	%/°C
Corriente	Imp	10.11	A	Voltaje Vmpp	42.1	V
Corriente de cortocircuito	Isc	10.61	A	Circuito abierto Voc	50.2	V
Eficiencia	/ Área células	21.44	%	/ Área módulo	18.98	%

**Resumen del modelo**

**Parámetros principales**

Derivación R	1000 Ω
Rderiv(G=0)	4000 Ω
<b>Modelo serie R</b>	<b>0.24 Ω</b>
Serie R máx.	0.24 Ω
Serie R aparente	0.41 Ω

**Parámetros del modelo**

Gamma	0.989
IoRef	0.01 nA
muVoc	-163 mV/°C
muPMax fijo	-0.37 /°C

Figura 23. Configuración del módulo fotovoltaico para la simulación en PVsyst.

- En términos de balance energético mensual, en la Figura 26, Figura 27 y Figura 28, se muestran la energía generada, energía utilizada, el excedente no utilizado y faltantes; además se evidencia la variación estacional del sistema, mostrando mayor generación en los meses de mayor irradiancia (desde octubre a enero, coincidiendo con la época de estiaje). A partir de aquí se puede observar la correspondencia entre generación solar y carga, así como los periodos en los que se producen los principales faltantes de energía; además se puede evidenciar la eficiencia operativa del sistema, considerando condiciones reales, pérdidas térmicas, eléctricas y de conversión, mes a mes.

The screenshot shows the 'Definiciones para una batería' window with the following configuration details:

- Datos básicos:**
  - Modelo: ZTESM R.311, 100Ah
  - Fabricante: ZTE
  - Nombre de archivo: ZTE\_ZTESM R.311\_100Ah.BTR0.9DOD.BTR
  - Fuente datos: Datasheet 2023
  - Definición de parámetros personalizados
  - Prod. desde 2023
- Tecnología:** Lithium-ion, LFP
- Categoría:** Bloque de batería
- Configuración:**
  - Batería completa
  - Por elemento
- Parámetros básicos:**
  - Núm. de células en serie/en paralelo: 15 | 2 es decir 30 células
  - Voltaje nominal: 51.2 V
  - Capacidad en C10: 100.00 Ah
  - Resistencia interna @ temp. ref.: 22.50 mΩ
  - Temperatura de referencia: 25.0 °C
  - Eficiencia coulombica: 96.0 %
- Comportamiento en los límites:**
  - Voltaje de corte de carga: 57.6 V
  - Voltaje de corte de descarga: 43.2 V
  - Corriente de carga máxima: 100 A
  - Corriente de descarga máxima: 100 A
  - Temperatura mínima de carga: 0 °C
  - Temperatura mínima de descarga: -20 °C
- Indicadores de batería llena:**
  - Energía almacenada en DOD: 90 %
  - Energía total almacenada (3092 cidos): 15.0 MWh
  - Energía específica: 113 Wh/kg
  - Peso específico: 9 kg/kWh
- Info: Renormalización a C10:**
  - Hoja de datos Capacidad nominal: 100.0 Ah
  - Definido para una tasa de descarga de: 5.00 Horas
  - =>C10 correspondiente según modelo de Peukert: 101.4 Ah

Figura 24. Configuración de baterías para la simulación en PVsyst.

Es importante señalar que el modelo implementado en PVsyst para la simulación presenta una simplificación de la realidad; al contemplar una carga constante, no se tiene presente la reducción de demanda durante los periodos de inactividad académica entre semestres, por lo que los resultados reflejan una condición de uso continuo que puede sobrestimar parcialmente el requerimiento energético real. Sin embargo, esta aproximación permite establecer un escenario conservador en el diseño, útil para garantizar el suministro durante los momentos críticos, y resulta adecuada para validar la coherencia técnica del dimensionamiento propuesto.

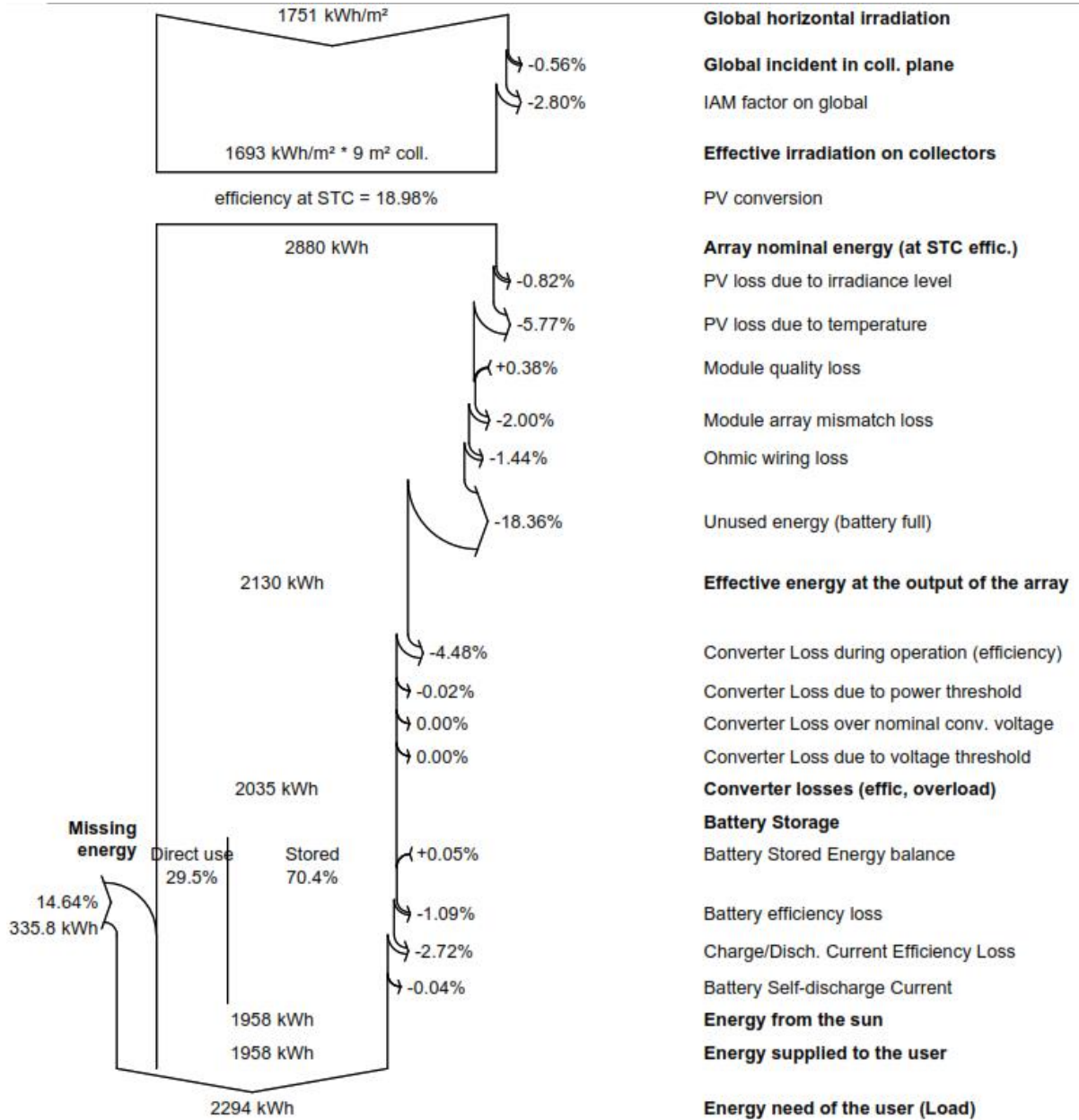


Figura 25. Diagrama de pérdidas energéticas del sistema fotovoltaico simulado en PVsyst.

### Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
January	159.7	145.5	215.9	41.61	25.20	169.6	194.8	0.871
February	138.5	129.7	193.0	32.43	23.01	152.9	175.9	0.870
March	144.6	139.6	208.7	32.64	25.54	169.3	194.8	0.869
April	140.6	140.3	207.4	39.05	25.07	163.4	188.5	0.867
May	134.8	138.5	205.2	43.78	39.42	155.4	194.8	0.798
June	128.5	134.0	199.4	41.96	37.24	151.3	188.5	0.803
July	132.6	136.7	204.0	34.57	33.18	161.6	194.8	0.830
August	138.2	138.4	207.1	33.47	27.63	167.2	194.8	0.858
September	141.7	137.9	203.7	38.01	29.45	159.1	188.5	0.844
October	158.6	149.4	221.3	44.39	24.29	170.5	194.8	0.876
November	166.9	153.6	225.9	53.84	23.66	164.9	188.5	0.875
December	166.5	148.9	221.8	43.26	23.01	171.8	194.8	0.882
Year	1751.2	1692.6	2513.6	479.02	336.71	1956.9	2293.6	0.854

#### Legends

- GlobHor Global horizontal irradiation
- GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
- E\_Avail Available Solar Energy
- EUnused Unused energy (battery full)
- E\_Miss Missing energy
- E\_User Energy supplied to the user
- E\_Load Energy need of the user (Load)
- SolFrac Solar fraction (EUsed / ELoad)

Figura 26. Balance mensual de generación y consumo energético del sistema simulado - PVsyst.

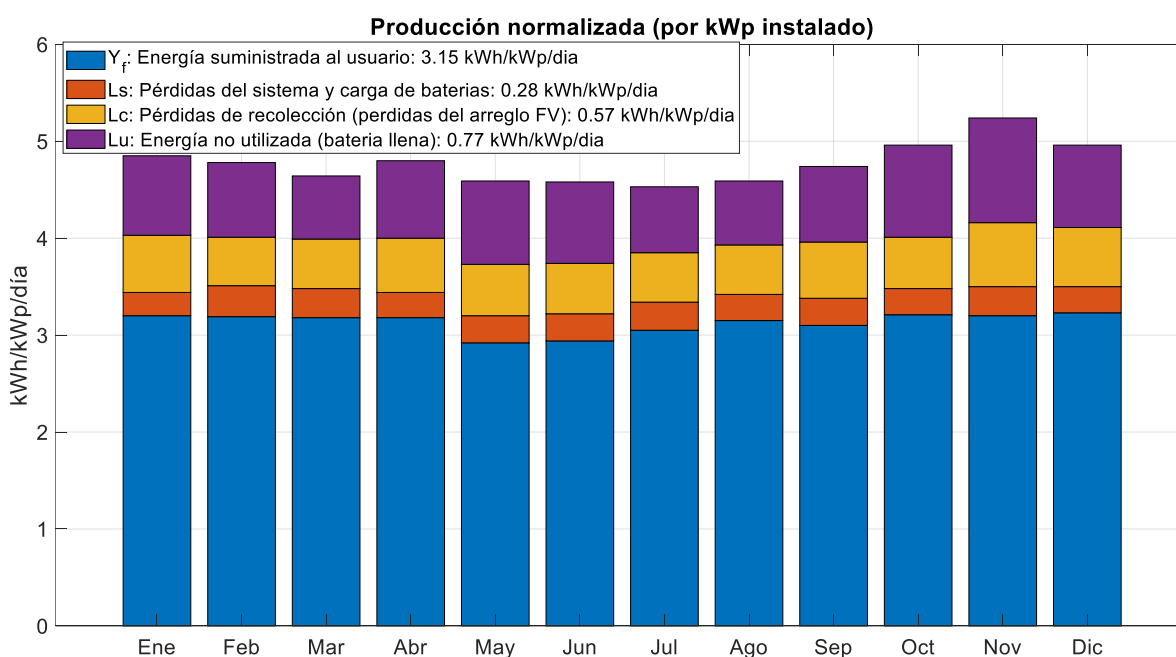


Figura 27. Producción mensual normalizada del sistema simulado – PVsyst. Fuente: elaboración propia (2025)

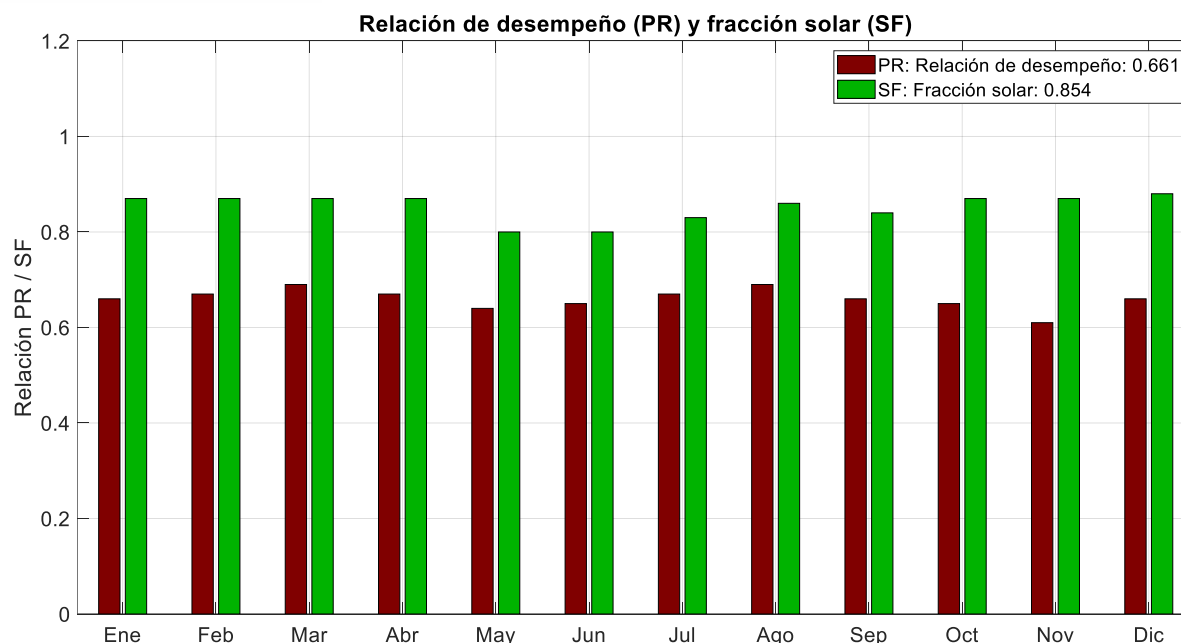


Figura 28. Índice de desempeño mensual del sistema simulado – PVsyst. Fuente: elaboración propia (2025)

### 3.6. Validación del prototipo en el Laboratorio de Micro-Red

Como parte final dentro de este capítulo, se realiza la validación del diseño del sistema fotovoltaico propuesto para el aula prototipo, a través de una comparación técnica con el sistema ya implementado en el Laboratorio de Micro-Red de la Universidad de Cuenca. Este análisis busca verificar la coherencia técnica del dimensionamiento desarrollado para el aula prototípica y su viabilidad práctica mediante el análisis de calidad de energía, amparada en la regulación Nro. ARCERNNR 002/20, del sistema funcional instalado en condiciones similares de operación.

El sistema de referencia del Laboratorio de Micro-Red (ver Figura 29) cuenta con un generador fotovoltaico compuesto por dos cadenas (strings) de cuatro módulos en serie, utilizando paneles ARTESA A-335P GS de 335 Wp, lo que suma una potencia instalada total de 2680 Wp. Este sistema está conectado a un inversor híbrido AMPERE SQUARE S 3.3 de 3 kW, el cual incorpora una batería de litio de 51.8 V y 58 Ah, equivalente a aproximadamente 3.0 kWh nominales.

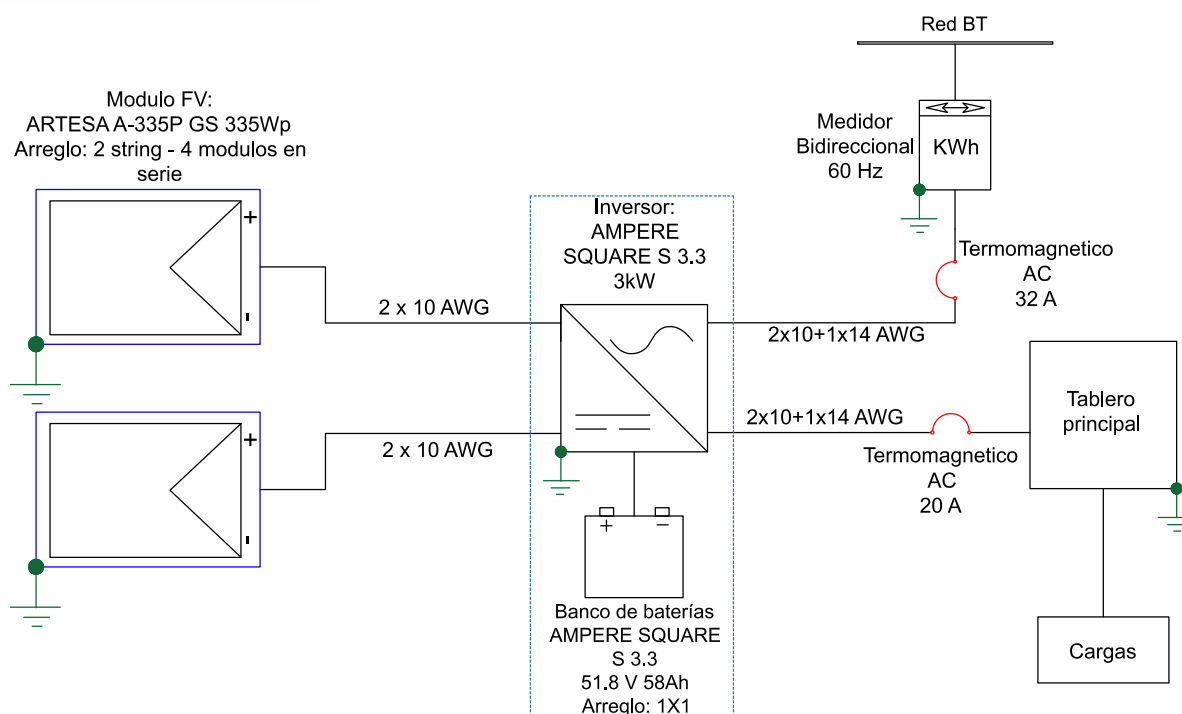


Figura 29. Diagrama unifilar del SFV implementado en el Laboratorio de Micro-Red. Fuente: elaboración propia (2025).

A continuación, se presenta una comparativa entre los principales componentes y características técnicas del sistema propuesto para el aula prototipo y el sistema implementado en el laboratorio (ver Tabla 16). Esto permitirá comparar el desempeño teórico del dimensionamiento propuesto con el sistema instalado en el laboratorio; si bien no se trata de una validación directa mediante la implementación del prototipo debido a la indisponibilidad de algunos equipos dentro del Laboratorio de Micro-Red, esta comparación permitirá establecer si el diseño del prototipo es técnicamente coherente con el sistema ya incorporado en el laboratorio, que opera en condiciones reales.

Esta comparación permite verificar que, si bien el sistema del laboratorio cuenta con una mayor potencia instalada y un almacenamiento más limitado, su desempeño ha sido adecuado para respaldar el funcionamiento de un aula en condiciones reales. Por lo tanto, el prototipo propuesto (con menor generación, pero mayor capacidad de almacenamiento) puede ser considerado técnicamente viable para atender la demanda horaria promedio del aula estudiada, especialmente en el rango de autonomía previsto entre las 07:00 y las 19:00 horas.

Tabla 16. Comparación técnica entre el prototipo propuesto y el sistema del Laboratorio de Micro-Red. Fuente: elaboración propia (2025).

Parámetro	Prototipo propuesto	Sistema en Laboratorio
Potencia instalada (FV)	1700 Wp	2680 Wp
Distribución de strings	1 string de 4 módulos en serie	2 strings de 4 módulos en serie
Tipo de panel	Trina Solar Vertex 425 Wp (monocristalino)	ARTESA A-335P GS 335 Wp (policristalino)
Inversor híbrido	Growatt SPF 3000TL LVM-ES (3 kW)	AMPERE SQUARE S 3.3 (3 kW)
Banco de baterías	LFP 51 V, 100 Ah (5.12 kWh nominales)	LFP 51.8 V, 58 Ah (3.0 kWh nominales)
Sistema de conexión	Híbrido, sin inyección a red	Híbrido, sin inyección a red

Una vez establecido la validez del sistema fotovoltaico para el aula prototipo mediante la comparación con el sistema ya implementado, a continuación, se detalla el análisis de calidad de energía, el cual sentará una base técnica para determinar la viabilidad de incorporar un sistema fotovoltaico de respaldo ante fallos de suministro del servicio de electricidad. Para este análisis de calidad de energía se usarán los datos registrados por el analizador AEMC 8333 durante un periodo de medición de 7 días con intervalos de 10 minutos como dicta la regulación Nro. ARCERNR 002/20; la medición registró los datos a partir del viernes 13/06/2025 y finalizó el viernes 20/06/2025, obteniendo los siguientes resultados (ver Tabla 17).

Tabla 17. Resultados del análisis de calidad de energía para el SFV del Laboratorio de Micro-Red. Fuente: elaboración propia (2025).

Parámetro	Promedio	Máximo	Mínimo	Desv_Estandar $\sigma$
$\Delta V$ (%)	1.092	4.173	-5.275	1.741
$P_{st}$	0.507	2.18	0.23	0.297
THD (%)	0.892	1.5	0.5	0.191
TDD (%)	2.676	7.115	0.1	1.665
Frecuencia (Hz)	59.985	60.02	59.94	0.0101

### 3.6.1. Variación de nivel de voltaje $\Delta V$

Según la regulación Nro. ARCERNNR 002/20, para los niveles de bajo voltaje, las variaciones de tensión deben mantenerse dentro del  $\pm 8\%$  respecto al valor nominal [20]. En la Figura 30, si bien se observa una notable variabilidad de voltaje a lo largo del periodo de medición, los valores se mantuvieron dentro del margen permitido; con un valor promedio de variación de 1.092% y una desviación estándar de 1.741, el sistema presenta fluctuaciones de tensión moderadas pero estables. Además, se observa que los datos obtenidos se ubican, en su mayoría, dentro de la franja o intervalo de confianza, lo cual demuestra que, aunque el sistema presente cierta oscilaciones inherentes a cargas variables, la operación del sistema fotovoltaico no introduce perturbaciones significativas en el nivel de tensión; además se observa que esta variación cumple con lo dictado en la normativa.

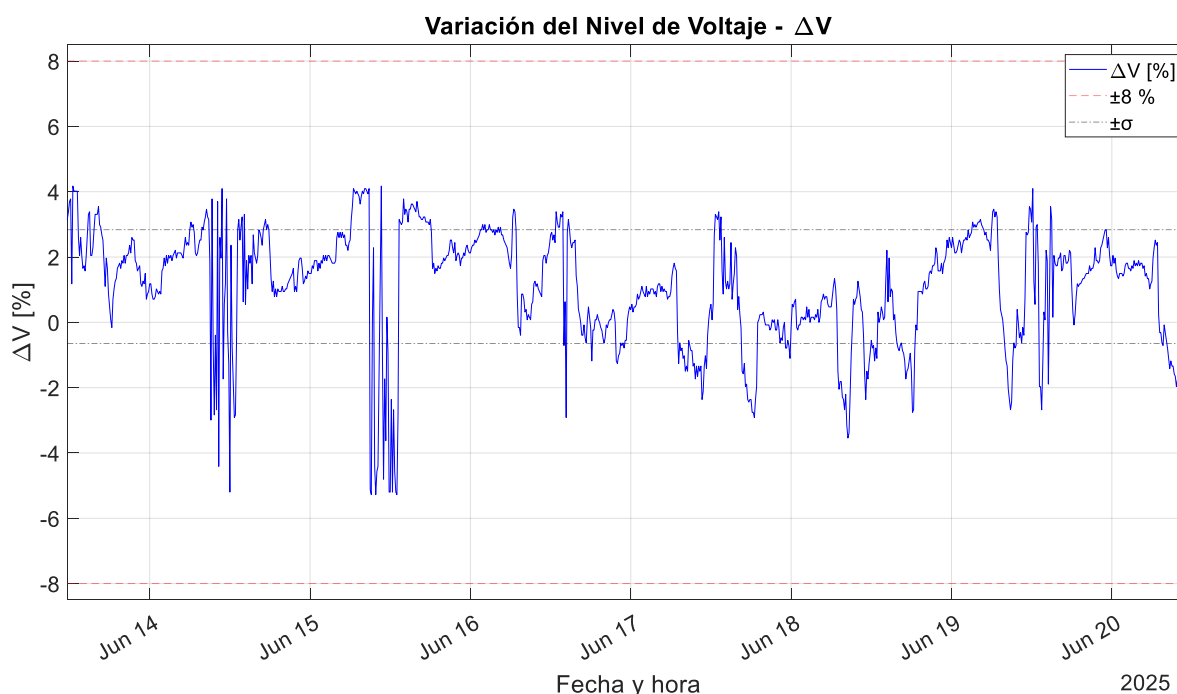


Figura 30. Curva del registro de variación de nivel de voltaje para el SFV del Laboratorio de Micro-Red. Fuente: elaboración propia (2025).

### 3.6.2. Perturbación rápida de voltaje (Flicker – $P_{st}$ )

Otro parámetro de importancia dentro de la regulación Nro. ARCERNNR 002/20 corresponde a las perturbaciones rápidas de tensión, mismas que su valor no debe ser mayor a 1 [20]. En la Figura 31 se observa que, si bien existen momentos en donde se supera el límite establecido, estos apenas representan un 6.342% del total de las muestras analizadas. Entre las principales causas a tener en cuenta para que se produzcan estos valores fuera del rango, podría ser la conexión y desconexión de equipos. Estos eventos, aunque breves afectan las

condiciones de estabilidad de voltaje, pero a pesar de estos casos puntuales, el valor promedio de  $P_{st}$  fue de 0.507, con una desviación estándar de 0.297, lo que indica que la mayor parte del tiempo el sistema mantiene un nivel de flicker dentro del umbral permisible.

Analizando los datos más a profundidad, se identificó los periodos del día en donde se aprecian estos eventos que sobrepasan el límite establecido en la regulación vigente; siendo la mayor ocurrencia entre las 09:00 y las 15:00 (62 de los 64 eventos identificados, representando el 96.88%). La normativa exige que el 95% de los datos registrados cumplan con el límite establecido para perturbaciones de corta duración, es decir, se podría incumplir en el 5% de las muestras; sin embargo, se tiene un incumplimiento del 6.342%, violando lo que dicta la normativa vigente. Sin embargo, se debe tener en consideración realizar un estudio minucioso de tal manera que se pueda detectar el origen de estas anomalías y mitigarlo para cumplir con lo que dicta la regulación; o a su vez, implementar medidas correctivas como la implementación de filtros.

### **3.6.3. Distorsión armónica total de voltaje (THD)**

Respecto a los armónicos de tensión, la normativa establece un límite del 8% para niveles de bajo voltaje [20]. En la Figura 32 se observa que los valores registrados son considerablemente inferiores al margen establecido; presentando un valor promedio de THD de 0.892% y una variación estándar de 0.191, lo que confirma que el sistema opera con un perfil armónico muy bajo, lo que implica que los equipos electrónicos del SFV (como el inversor) poseen filtros adecuados que minimizan la generación o propagación de armónicos. La baja variabilidad que se presenta, refuerza la estabilidad y confiabilidad del sistema con el resto de cargas conectadas.

### **3.6.4. Distorsión armónica total de corriente (TDD)**

Respecto a los armónicos de corriente, la normativa establece un límite del 5% [20]. En la Figura 33 se muestra que, de los valores registrados, existen momentos en donde se incumplen con el límite establecido, específicamente el 5.75% de las muestras. Entre las principales causas a tener en cuenta para que se produzcan estos valores fuera del rango, podría ser por la propia naturaleza del inversor, las cargas no lineales (por ejemplo, cargadores de laptops, el uso de pantallas o algún otro dispositivo electrónico) o la operación en condiciones de baja irradiancia o de poca carga. Estos eventos, aunque breves afectan las condiciones de estabilidad de sistema, pero a pesar de estos casos puntuales, el valor promedio fue de 2.676, con una desviación estándar de 1.665, lo que indica que la mayor parte del tiempo el sistema mantiene un nivel de TDD dentro del rango permitido.

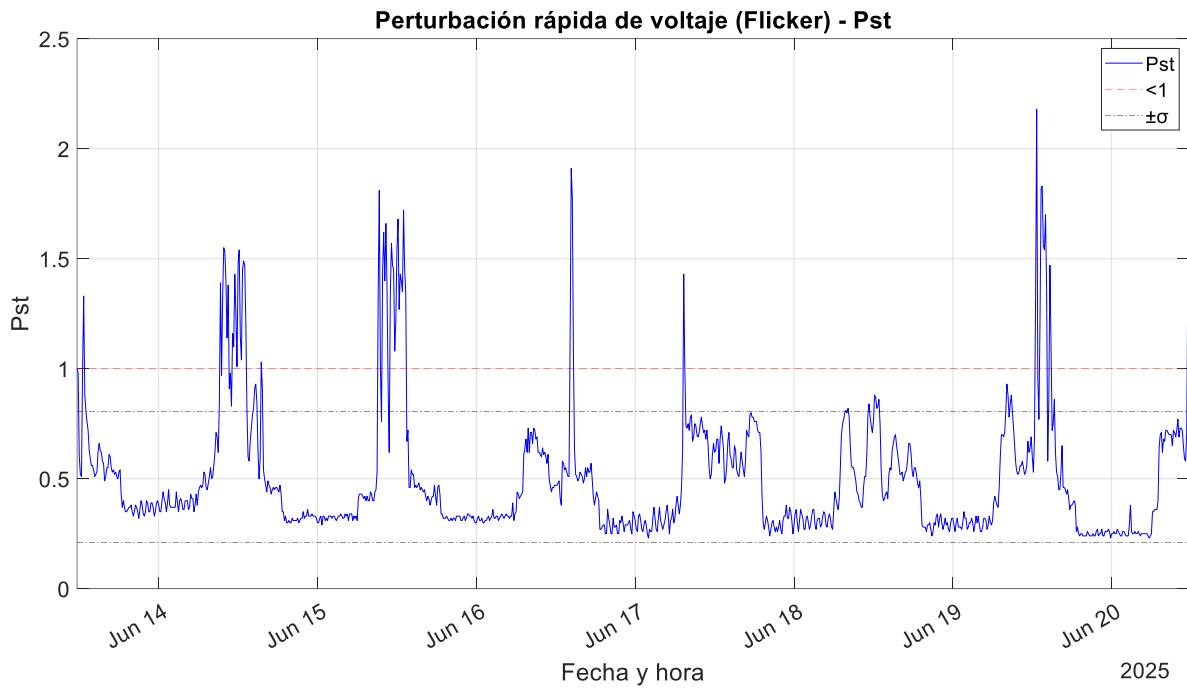


Figura 31. Curva del registro de flickers para el SFV del Laboratorio de Micro-Red. Fuente: elaboración propia (2025).

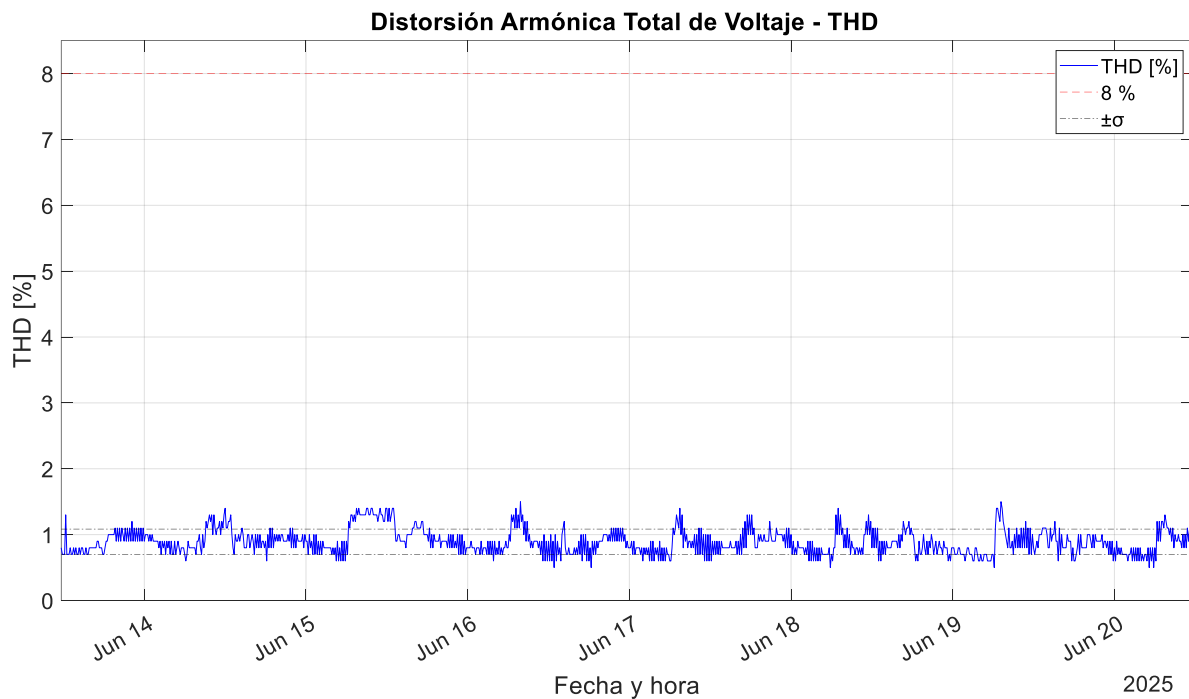


Figura 32. Curva del registro de THD para el SFV del Laboratorio de Micro-Red. Fuente: elaboración propia (2025).

Analizando un poco más a detalle, se identificó los periodos del día en donde se aprecian estos eventos que sobrepasan el límite indicado en la regulación vigente; siendo de mayor ocurrencia entre las 09:00 y las 13:00 (con 46 apariciones de 57 identificados, representando

el 80.7%). La normativa exige que el 95% de los datos registrados cumplan con el límite establecido para TDD, es decir, se podría incumplir en el 5% de las muestras, teniendo para este caso de estudio se incumple lo normado al incurrir con un 5.75% de las muestras, mayor al permitido. Sin embargo, se debe tener en consideración realizar un estudio minucioso de tal manera que se pueda detectar el origen de estas anomalías y mitigarlas para cumplir con lo que dicta la regulación; o a su vez, implementar medidas correctivas como la implementación de filtros de armónicos.

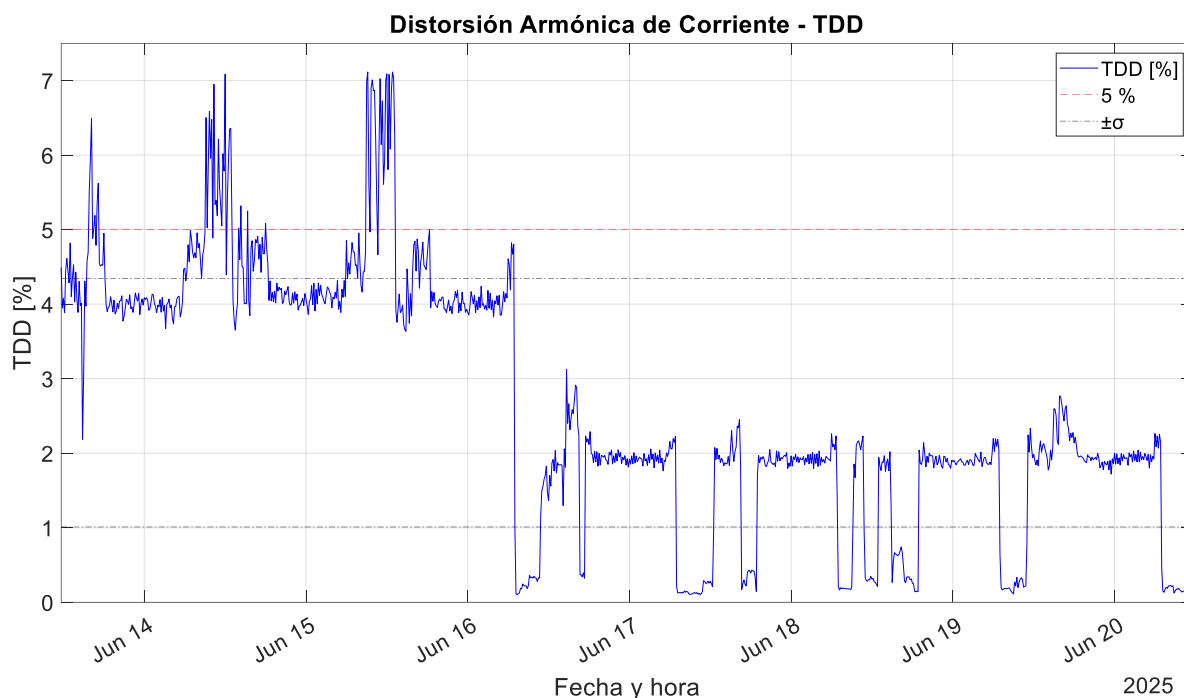


Figura 33. Curva del registro de TDD para el SFV del Laboratorio de Micro-Red. Fuente: elaboración propia (2025).

### 3.6.5. Estabilidad de frecuencia

A pesar que el parámetro de frecuencia no se lo toma encuentra dentro de la regulación Nro. ARCERNR 002/20, el Anexo H de la normativa para SGDA's (regulación Nro. ARCERNR 008/23), establece que los sistemas de generación distribuida para autoconsumo con una potencia nominal menor a 1 MW, la frecuencia debe mantenerse dentro del rango de  $\pm 1$  Hz respecto a la frecuencia nominal [13]. En la Figura 34 se aprecia una gran estabilidad de frecuencia, con un valor promedio de 59.985 Hz y una desviación estándar considerablemente mínima. Esta estabilidad lleva a comprobar la seguridad presente en el SFV implementado en el aula del laboratorio, garantizando una óptima operación de las cargas conectadas para un modo aislado o una excelente sincronización con la red si se decide operar al inversor híbrido en modo on grid.



Figura 34. Curva del registro de variación de frecuencia para el SFV del Laboratorio de Micro-Red. Fuente: elaboración propia (2025).

## Análisis de Resultados y Discusión

Este capítulo aborda detalladamente los resultados obtenidos a lo largo de este estudio, partiendo con el levantamiento de carga a partir del aula prototípica, misma que fue seleccionada tras un análisis del nivel de ocupación que presenta, correspondiente al 68% de su capacidad, el cual fue superior a las otras aulas candidatas; además de las disposiciones técnicas que viabilizaron la obtención de los datos de carga para el desarrollo del prototipo. Paralelamente se caracterizó el recurso solar disponible en la zona de estudio, el cual fue fundamental para el dimensionamiento del SFV.

El análisis del recurso, junto al levantamiento de carga, permitieron dimensionar el sistema de generación fotovoltaica acorde a las necesidades del aula seleccionada, estableciendo una capacidad instalada de 1.7kW repartida en el uso de 4 paneles fotovoltaicos monocristalinos de 425W cada uno. A este sistema de generación, se incorpora el uso de un inversor híbrido, el cual permita la gestión energética entre el sistema fotovoltaico propuesto para el respaldo energético y la red pública. Este inversor consta de una potencia de 3kW, al que se le incorpora una batería de ion litio para el almacenamiento, la cual posee una capacidad de 5.12kWh, proveyendo la autonomía necesaria para el desarrollo de las actividades académicas dentro del aula prototipo.

Posteriormente, se estableció una correlación entre el dimensionamiento calculado y la simulación del sistema fotovoltaico propuesto empujando el software PVsyst, con el cual se pudo analizar el problema desde otra perspectiva; y finalmente la validación comparativa con un sistema existente en operación mediante el análisis de calidad de energía. Al llevar a cabo este análisis, permite verificar la viabilidad técnica y operativa del prototipo de un aula energéticamente autónoma bajo condiciones reales como las presentes en el campus Balzay de la Universidad de Cuenca, como solución ante posibles interrupciones del suministro de energía eléctrica.

### 4.1. Recurso solar

Conocer el recurso solar representa uno de los más importantes parámetros a la hora de dimensionar sistemas fotovoltaicos, ya que influye directamente en la cantidad de energía eléctrica que se puede generar. Para este estudio se emplearon los datos de irradiación solar, registrados por la estación meteorológica del Laboratorio de Micro-Red.

Con el fin de validar la confiabilidad de estos datos locales, se realizó una comparación con los valores de irradiación solar de la base de datos del National Renewable Energy Laboratory (NREL); en particular, se relacionaron las Horas Solares Pico (HSP) diario promedio mensual.

Esta comparación reveló un error promedio de 4.62% entre los datos registrados localmente y los obtenidos del NREL, lo cual se considera aceptable para los estudios de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos; lo que permitió validar la veracidad de los datos registrados por la estación del Laboratorio de Micro-Red, con un valor promedio anual de 4.377 h/día, mismo que fue aplicado en el diseño del SFV con almacenamiento para el aula prototípica del campus Balzay de la Universidad de Cuenca.

A la par, la Figura 35 muestra la evolución mensual de las HSP a lo largo del año calendario, y al incorporar una nueva fuente de información para llevar una comparación más amplia, en donde se analizan: datos medidos localmente, datos del NREL y valores del archivo meteorológico TMY proporcionado por el software PVsyst, basado en el NSRDB (1998 – 2020), Anexo N. Como se puede observar, existe una buena correlación general entre las tres bases de datos, aunque se identifican discrepancias relevantes en los meses de abril a julio, donde los valores medidos localmente son significativamente menores en comparación con los valores del NREL y de los usados por PVsyst. Este desajuste no necesariamente implica un error en el tratamiento de los datos locales, sino que podría atribuirse a la propia naturaleza de las estimaciones del NREL debido a las razones expuestas en la sección 3.1.2. Recurso solar, y de igual manera esta razón se atribuye a los datos del archivo meteorológico TMY proporcionado por el software PVsyst en donde la discrepancia es mucho mayor, pudiendo deberse a que la base de datos no está actualizada (1998 – 2020). Cabe destacar que, al seguir las líneas de tendencia entre una serie con otra, las mediciones hechas en el laboratorio guardan un comportamiento semejante respecto a la base de datos usada por PVsyst, destacando a los meses de abril, mayo, junio y julio como los meses en donde se tiene menor recurso solar para el aprovechamiento; en cambio, los meses de septiembre a enero muestran mayor cantidad de HSP lo que se traduce en mayor cantidad de irradiación durante esos meses, en los cuales existiría más generación de energía fotovoltaica. Bajo estas consideraciones es correcto confirmar la validez de los datos obtenidos por parte del Laboratorio de Micro-Red e incorporarlos dentro del dimensionamiento del SFV de este estudio.

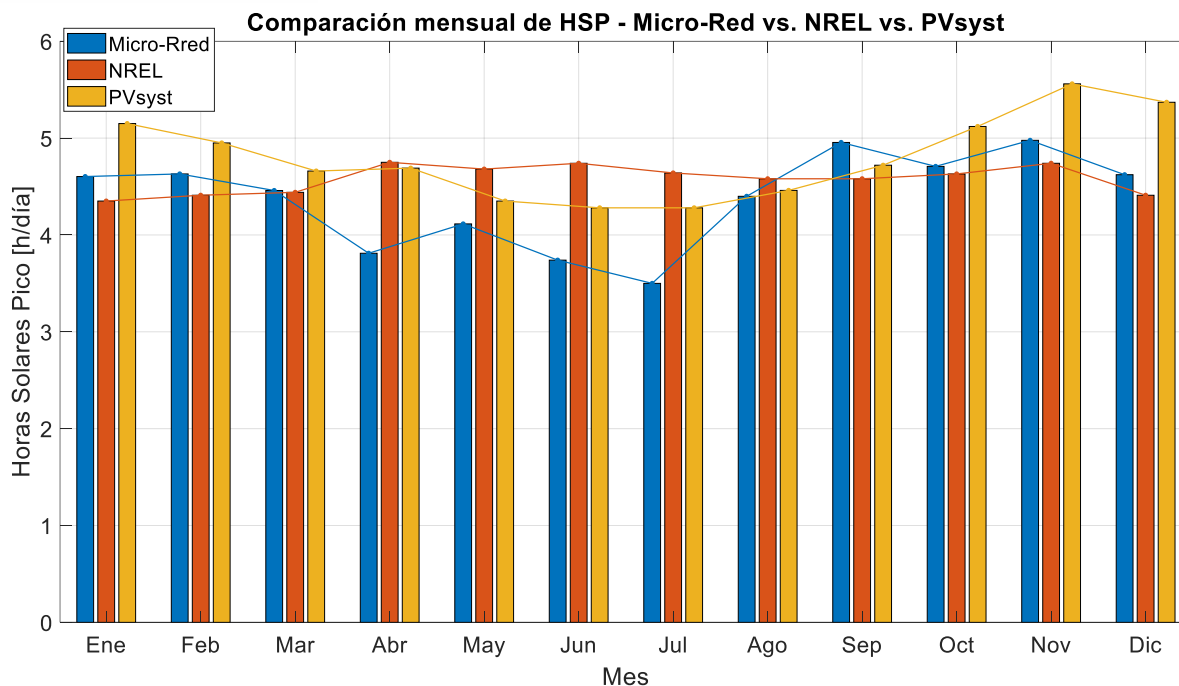


Figura 35. Comportamiento mensual de HSP Micro-Red vs. NNREL vs. PVsyst. Fuente: elaboración propia (2025).

#### 4.2. Demanda eléctrica

La correcta estimación de la demanda energética es fundamental para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo, ya que representa la base sobre la cual se define la capacidad tanto en paneles fotovoltaicos a incorporar como la capacidad de almacenamiento. Al momento de la estimación de carga llevada a cabo en la sección 3.3. Estimación de la demanda energética del aula prototipo., a través del análisis de los históricos de consumo del aula del Laboratorio de Micro-Red, se obtuvo una demanda anual proyectada de 2293.591 kWh/año (ver Tabla 11), la cual fue calculada considerando las 52 semana aproximadas del año, de los cuales 260 días corresponden a los días laborales y 105 a días de fines de semana, teniendo un consumo promedio diario de 7.222 kWh/día para los días laborales y 3.998 kWh/día para los días de fines de semana. Lo que permite reconocer que durante los fines de semana el consumo se reduce de manera significativa debido a la evidente reducción de las actividades académicas en estos días.

No obstante, para contrastar esta estimación proyectada, durante la selección del aula prototípica, se llevó a cabo un levantamiento real de cargas con el fin de tener un estimado promedio de carga instalada por alumno respecto al nivel de ocupación que se tiene presente dentro del aula prototipo (ver Tabla 8 y Tabla 10). El procedimiento determinó que, dentro del aula del Laboratorio de Micro-Red, la potencia media consumida por estudiante es de 67.5

W, así como también se identificó que el promedio de estudiantes por sesión de clase corresponde a 17.

Estos resultados indican que, respecto a las otras aulas candidatas consideradas para el estudio, el aula del laboratorio presenta mayor demanda por estudiante y un mayor nivel de ocupación, respecto a su capacidad máxima, de 68%, el cual permite validar su elección y considerar su perfil de demanda como un parámetro clave dentro del dimensionamiento del sistema fotovoltaico propuesto para el aula piloto.

#### **4.3. Producción del sistema**

Una vez dimensionado el SFV para el aula prototípica, con el objetivo de validar la coherencia del mismo, se llevó a cabo una comparación entre la energía anual generada obtenida mediante los cálculos matemáticos y la obtenida a partir de la simulación realizada en PVsyst. Mediante de los cálculos, se obtuvo que la capacidad de producción anual del sistema corresponde a 2444.33 kWh/año, mientras que la simulación de PVsyst reportó una generación de 2513.6 kWh/año, lo que representa una diferencia de 69.27 kWh/año, 2.833% mayor respecto al valor calculado. Al comparar estos resultados, se ratifica la validez del dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el aula prototipo; vale la pena resaltar que la mayor producción vista por parte de la simulación se debe a que los datos de irradiación (Anexo N) son ligeramente mayores que los presentes en la localidad del campus Balzay, por ende, se tienen más HSP y permitiendo así al sistema simulado generar mayor energía eléctrica.

En cuanto al factor de planta (FP), se observa la diferencia consistente entre los cálculos matemáticos y el uso de PVsyst, obteniendo un factor de planta de 16.87% para los resultados obtenidos en el software, ligeramente mayor que el obtenido en los cálculos (16.41%), lo cual es coherente con la mayor producción anual estimada por el programa debido a la disponibilidad de más HSP dentro de la simulación. Estos resultados se encuentran dentro del rango típico de factor de planta para sistemas fotovoltaicos en condiciones reales de operación, lo cual valida los resultados y la coherencia del dimensionamiento obtenido en los cálculos respecto al obtenido en PVsyst.

#### **4.4. Almacenamiento del sistema**

En cuanto al sistema de almacenamiento, componente esencial dentro de sistemas fotovoltaicos híbridos y autónomos, a través de los cálculos se obtuvo que el almacenamiento requerido para una autonomía de 12 horas (respecto al periodo diario académico de 07:00 horas a 19:00 horas) para el aula prototípica es de 78.36 Ah, y considerando un factor de

holgura del 25% adicional ante posibles incrementos de demanda u horas de autonomía, la capacidad de almacenamiento requerida para el sistema fotovoltaico prototípico corresponde a 97.95 Ah, optando por mantener una capacidad de 100 Ah (5.12 kWh).

Para validar este dimensionamiento se realizó la simulación del sistema en PVsyst, en donde se modeló el sistema de almacenamiento empleando baterías con las mismas características eléctricas que las implementadas para el cálculo matemático. A partir de los resultados de la simulación, se obtuvo que el sistema a pesar de estar bien dimensionado para los requisitos del aula prototípica, se evidencia una energía no suministrada de 336.71 kWh/año, lo cual sugiere que, bajo condiciones de baja irradiancia como días nublados, el sistema no logra mantener completamente la autonomía deseada.

Complementariamente, en los resultados de PVsyst se evidencia un excedente de energía no utilizada de 479.02 kWh/año que no es capturado por el sistema de almacenamiento, lo cual sugiere que existe potencial para almacenar más energía, implicando una ampliación en el banco de baterías lo cual mejoraría el aprovechamiento de la generación fotovoltaica y aumentar la cobertura total de la demanda.

Aunque el sistema de almacenamiento fue dimensionado correctamente para respaldar las necesidades de consumo en condiciones promedio del aula, la posible causa principal de la limitación del sistema de almacenamiento obtenido en el cálculo radica en que no se consideraron escenarios de baja irradiancia prolongada ni variaciones estacionales que pueden exigir una mayor autonomía.

#### **4.5. Calidad de energía y validación del prototipo.**

A partir del análisis de la calidad de energía evaluada, se evidencia que el sistema fotovoltaico existente en el aula del Laboratorio de Micro-Red de la Universidad de Cuenca cumple satisfactoriamente con los requisitos técnicos establecidos por la normativa vigente. Todos los parámetros evaluados se encuentran dentro de los límites admisibles, o en su defecto, presentan desviaciones mínimas atribuibles a condiciones de operación transitorias del sistema, las cuales no condicionan su óptima operación.

En particular, el hecho de que algunas mediciones de flickers sobrepasaron momentáneamente el límite impuesto por la normativa en un pequeño porcentaje de las muestras analizadas, no compromete la calidad del suministro del sistema debido a su baja ocurrencia de alrededor de 6.342% de las veces dentro del periodo de análisis. Un caso similar se experimenta en cuanto a la distorsión de armónicos de corriente (TDD), presentando un ligero incumplimiento a lo dictado en la normativa, el 5.75% de las muestras

sobrepasan el límite establecido; se identificó que esta presencia de armónicos ocurre durante las sesiones de clases, pudiendo atribuir estas apariciones a la incorporación de las cargas electrónicas de los estudiantes (por ejemplo, cargadores de laptops, pantallas, etc), por ende se puede establecer que este incumplimiento se debe a la propia naturaleza de carga que experimenta el sistema, y al ser un bajo nivel de incumplimiento, se puede indicar que este comportamiento no compromete la calidad de operación del mismo. A pesar de que los incumplimientos de flickers y TDD son relativamente bajos, se debe tener en consideración la mitigación de estos efectos para obtener el cumplimiento de la normativa y una mejor calidad de suministro de energía. En cuanto a los parámetros de THD, variación de nivel de voltaje y estabilidad de frecuencia, al analizar a los datos registrados, se puede corroborar que cumplen con lo dictado por la normativa, de esta manera se refuerza la idea de integrar SFV con almacenamiento en baterías en entornos educativos, brindando respaldo energético para el desarrollo de las actividades académicas.

Además, al comparar el SFV del aula del Laboratorio de Micro-Red con el sistema prototípico propuesto para el aula seleccionada, se concluye que el desempeño del primero ha sido técnicamente adecuado para respaldar el funcionamiento del aula en condiciones reales de operación. Por lo tanto, a pesar de que el sistema fotovoltaico del prototipo presenta una menor capacidad de generación fotovoltaica, incorpora un sistema de almacenamiento en baterías de mayor capacidad. En consecuencia, estima que su desempeño energético será suficiente para cubrir las necesidades de carga del aula piloto y replicar satisfactoriamente los niveles de calidad de energía observados en el presente estudio, dado que el prototipo fue diseñado para trabajar bajo las mismas condiciones operativas que el sistema ya implementado. Esto respalda la viabilidad técnica del SFV propuesto para atender la demanda energética horaria del aula prototipo durante la jornada académica, comprendida entre las 07:00 y las 19:00 horas. De esta manera, se establece una base técnica que ratifica la incorporación del SFV propuesto como solución viable al problema planteado en este estudio.

## Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

El desarrollo de un prototipo de sistema fotovoltaico como una solución a posibles inconvenientes en el suministro de energía eléctrica por parte de la red pública surge como una alternativa, especialmente en el sector de la educación, donde disponer del suministro de energía es vital para el desarrollo de las actividades académicas, más aún en instituciones universitarias, ya que en estos entornos las actividades se llevan a cabo a lo largo del día e incluso en horas de la noche. Desde esa perspectiva, la incorporación de un sistema de almacenamiento en baterías garantiza la autonomía del sistema cuando las condiciones del recurso solar renovable no son lo suficientemente favorables para realizar la actividad de generación, ya sea por restricciones climáticas o el simple hecho de no disponer del recurso durante la noche. Por lo tanto, los resultados de este estudio reflejan la viabilidad del prototipo propuesto para un aula energéticamente autónoma, al incorporar un sistema fotovoltaico para el autoconsumo, el cual presenta una potencia nominal de 1.7kW, junto al uso de un inversor híbrido, el cual permita una gestión óptima del intercambio energético entre el SFV de respaldo propuesto (sin inyección a la red) y el sistema de distribución de energía eléctrica. A esto se le suma el uso de un sistema de almacenamiento mediante una batería de 5.12kWh, la misma que garantiza satisfacer las necesidades del aula piloto y proporcionando una autonomía de 12 horas, cubriendo efectivamente el periodo de actividades académicas durante el día en el entorno universitario. De tal modo que, la implementación de este tipo de generación distribuida para autoconsumo junto al almacenamiento de energía en baterías no solo garantizaría la autonomía necesaria para el desenvolvimiento de actividades académicas dentro del campus Balzay de la Universidad de Cuenca, sino que también resultaría en una buena práctica e iniciativa para el uso de energías renovables dentro del contexto del cuidado ambiental y la diversificación de la matriz energética.

Es aquí donde llevar a cabo un buen análisis del recurso solar disponible juega un papel protagónico, ya que permite conocer el comportamiento del mismo de tal manera que se pueda optimizar el aprovechamiento de energía solar para la generación de electricidad; y al usar datos reales provenientes de la estación meteorológica del Laboratorio de Micro-Red, se puede llevar un análisis y dimensionamiento más fino, ya que evalúa localmente el recurso solar en la zona de interés para el proyecto. Al mismo tiempo, se destaca la importancia de poder llevar un análisis comparativo las mediciones proporcionadas con el laboratorio, con otras bases de datos, ya sea la NREL, el NSRDB el cual implementa PVsyst, o el atlas solar del Ecuador del CONELEC, con los cuales se puedan contrastar la información y determinar

la precisión de las mediciones obtenidas, validando así la exactitud de las mismas para su uso en el dimensionamiento del sistema para el aula piloto.

Por otro lado, la caracterización de la carga a partir del levantamiento del perfil energético para el presente proyecto de estudio, permite comprender el comportamiento de la demanda a lo largo del día, detectando patrones de consumo característicos de instituciones universitarias, ya que, al analizar este tipo de espacios, se puede apreciar que las condiciones y comportamientos de la carga son muy variados, teniendo una alta demanda de energía durante el periodo comprendido entre las 07:00 y 19:00 horas. Analizar este comportamiento es muy importante, ya que en base a este se lleva a cabo la proyección de la demanda que presentará el aula prototipo a lo largo del año, mismo que es de vital importancia para el dimensionamiento de la capacidad de generación y almacenamiento del sistema propuesto. Por lo tanto, el correcto levantamiento y análisis del perfil de consumo del aula prototípica permite llevar a cabo un dimensionamiento preciso en donde se diseñe el sistema únicamente para las necesidades del aula, evitando así posibles sobre y sub dimensionamientos, mismos que ocasionarían problemas operativos a largo plazo, además de una inversión económica deficiente.

El correcto dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico con almacenamiento para autoabastecimiento del aula prototipo, viene a ser una consecuencia de los análisis previos, tanto de levantamiento y proyección de carga, como de análisis de disponibilidad del recurso solar. Su importancia en el dimensionamiento radica en que en base a estos se determinan los niveles de capacidad de generación y almacenamiento que requiere el aula prototípica para conseguir el objetivo de tener una autonomía durante las horas de alta demanda. Además, con el propósito de validar el dimensionamiento, se empleó el software PVsyst, el cual es una gran herramienta al momento de dimensionamientos para sistemas fotovoltaicos. La simulación permitió validar el nivel de producción de energía del sistema, obteniéndose 2513.6 kWh/año, ligeramente superior al cálculo estimado el dimensionamiento inicial (2444.33 kWh/año). Esta diferencia se debe a que el software de simulación emplea valores de irradiación solar más elevados, derivados de la base de datos del NSRDB (1998–2020), lo que genera una proyección algo más optimista de la generación fotovoltaica. Como consecuencia de estos niveles de producción de energía, el sistema propuesto presenta un factor de planta estimado de alrededor del 16%, mismo que resulta del uso de componentes con altos niveles de eficiencias técnicas entre sus características constructivas, sobre todo al utilizar paneles monocristalinos en el dimensionamiento del generador fotovoltaico.

En referente al sistema de almacenamiento del SFV propuesto, durante el dimensionamiento se consideró incorporar un factor de holgura ante el posible aumento de demanda energética o de tiempo de autonomía del sistema. Sin embargo, al realizar la simulación en PVsyst se obtuvo que la capacidad de almacenamiento del sistema permitiría asistir al 86% de la demanda del aula prototipo. Esta discrepancia se debe a que el software considera otras variables al momento de la simulación como pérdidas por eficiencia, autodescargas, entre otras condiciones operativas; además el programa no tiene en consideración que durante los fines de semana la demanda de energía es mucho menor a la presente durante los días laborables, lo que puede llevar a arrojar estos resultados. A pesar de ello, se puede afirmar que el dimensionamiento ha sido adecuadamente dimensionado, ya que la configuración propuesta permite cubrir la demanda presente en el aula prototipo, de tal manera que se cumple el objetivo propuesto para este trabajo de titulación.

Finalmente, durante la etapa de validación del sistema, si bien no fue posible llevar a cabo una comparación directa del prototipo debido a indisponibilidad de ciertos equipos en el Laboratorio de Micro-Red que impidió una verificación más acertada del sistema prototipo, se optó llevar a cabo el análisis de calidad de energía como método complementario de validación del prototipo; ya que, si bien las mediciones no se realizaron directamente en el proyecto propuesto, este fue dimensionado bajo las mismas condiciones de demanda que presenta el sistema fotovoltaico ya incorporado en el aula del Laboratorio de Micro-Red. Este análisis contempló los principales parámetros requeridos por la normativa vigente, tanto en lo referente a sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento, como en relación con los estándares técnicos de la calidad del servicio de energía eléctrica. Los resultados obtenidos evidencian el cumplimiento satisfactorio de dichos parámetros, manteniendo los niveles de variación de voltaje, flicker, estabilidad de frecuencia, y distorsión armónica total de voltaje y corriente dentro de los límites establecidos por las normativas vigente. Esto permite inferir, de manera indirecta pero técnica, la validez operativa del prototipo de un aula energéticamente autónoma con almacenamiento en baterías dentro del campus Balzay de la Universidad de Cuenca.

## **5.2. Recomendaciones**

Considerar los periodos de recesión académica y feriados para un dimensionamiento más detallado de sistema, ya que durante estos periodos la demanda de energía decae drásticamente. Como una propuesta para trabajos futuros, se sugiere aprovechar estos periodos de baja demanda para inyectar de la energía generada por el sistema a la red, ya

que, al disponer de un inversor híbrido, se puede llevar al sistema a trabajar en esas condiciones de operación.

Realizar las pruebas experimentales con el prototipo propuesto para el aula del Laboratorio de Micro-Red, sometiéndolo a distintos modos de operación, tales como: operación del sistema sin inyección a la red en modo aislado, análisis del comportamiento del sistema ante alta variabilidad y demanda de carga, y evaluación de la autonomía del sistema de almacenamiento. Asimismo, se plantea considerar la implementación de nuevas tecnologías en los equipos utilizados, como las analizadas en este trabajo, con el fin de contribuir al desarrollo de proyectos a futuro dentro del Laboratorio de Micro-Red.

## Referencias

- [1] International Energy Agency, "Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028," Jan. 2024, *Paris*. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- [2] Q. Hassan *et al.*, "A comprehensive review of international renewable energy growth," 2024, *KeAi Communications Co*. doi: 10.1016/j.enbenv.2023.12.002.
- [3] V. Saxena *et al.*, "Navigating the complexities of distributed generation: Integration, challenges, and solutions," Dec. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.egy.2024.09.017.
- [4] REN21, "RENEWABLES 2024 GLOBAL STATUS REPORT - RENEWABLES IN ENERGY SYSTEMS & INFRASTRUCTURE," Paris, 2024.
- [5] Solarwatt, "Financiación del KfW para el almacenamiento en baterías - Programa 275," KfW 275. Accessed: Jan. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.solarwatt.de/ratgeber/kf-w-programm-275>
- [6] California Public Utilities Commission, "Self-Generation Incentive Program (SGIP)." Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: [https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/files/uploadedfiles/cpucwebsite/content/news\\_room/newsupdates/2020/sgip-residential-web-120420.pdf](https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/files/uploadedfiles/cpucwebsite/content/news_room/newsupdates/2020/sgip-residential-web-120420.pdf)
- [7] Australian Government and Clean Energy Regulator, "Small-scale Renewable Energy Scheme." Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: <https://cer.gov.au/schemes/renewable-energy-target/small-scale-renewable-energy-scheme>
- [8] HuffPost, "El país obsesionado con los paneles solares empuja su red eléctrica hasta rozar el colapso." Accessed: Jan. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.huffingtonpost.es/sociedad/el-pais-obsesionado-paneles-solares-empuja-relectrica-rozar-colapso.html>
- [9] Agencia de Sostenibilidad Energética, "Comuna Energética." Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.comunaenergetica.cl/sobre-comuna-energetica/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%3F,en%20las%20comunas%20de%20Chile>.
- [10] Gobierno de Brasil and Ministerio de Minas y Energía, "MME trae más desarrollo, seguridad energética y calidad de vida a la población de la Amazonía." Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-leva-mais-desenvolvimento-seguranca-energetica-e-qualidade-de-vida-para-a-populacao-da-amazonia>
- [11] Secretaría de Energía, "Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía." Accessed: Jan. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/sener/articulos/el-fondo-para-la-transicion-energetica-y-el>

- aprovechamiento-sustentable-de-la-energia-es-un-instrumento-de-politica-publica-de-la-secretaria
- [12] Diario El Mercurio, “Etapa anuncia el fin de la sequía hidrológica en Cuenca - Diario El Mercurio,” Noticias nacionales. Accessed: Jan. 01, 2025. [Online]. Available: <https://elmercurio.com.ec/2024/12/20/fin-sequia-hidrologica-cuenca/>
- [13] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), “Regulación Nro. ARCERNNR 008/23: Marco normativo de la generación distribuida para el autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica,” 2023, *Quito, Ecuador*.
- [14] J. Humala, “Aulas autosustentables con energía solar en la Universidad de Cuenca,” Universidad de Cuenca. Accessed: Jan. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.ucuenca.edu.ec/noticias/aulas-autosustentables-con-energia-solar-en-la-universidad-de-cuenca/#:~:text=Este%20espacio%20acad%C3%A9mico%20utiliza%20paneles,Instrumentaci%C3%B3n%20que%20desarrollaron%20el%20proyecto.>
- [15] B. Pérez, “Aula autosostenible usa la energía solar,” El Mercurio. Accessed: Jan. 04, 2025. [Online]. Available: [https://elmercurio.com.ec/2024/10/26/aula-autosostenible-usa-la-energia-solar/?fbclid=IwY2xjawliwntleHRuA2FibQIxMAABHaWt3a12ILIBEZ\\_IV8mKIQDOQgaKDWxGk2wRfjpTsaNVr35bxHBJW69LGg\\_aem\\_PzPy6aKnUEkbz3vPhrtzPQ#goog\\_rewarded](https://elmercurio.com.ec/2024/10/26/aula-autosostenible-usa-la-energia-solar/?fbclid=IwY2xjawliwntleHRuA2FibQIxMAABHaWt3a12ILIBEZ_IV8mKIQDOQgaKDWxGk2wRfjpTsaNVr35bxHBJW69LGg_aem_PzPy6aKnUEkbz3vPhrtzPQ#goog_rewarded)
- [16] W. Almeida, “Generación Distribuida y su Potencial Aplicación en Ecuador,” *Revista Técnica “Energía,”* vol. 2, pp. 83–86, Jan. 2006, doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v2.n1.2006.306>.
- [17] L. H. Berrío and C. Zuluaga, “Smart Grid and solar photovoltaic energy as renewable energy source for the distributed generation in the global energy context,” *ingeniería y desarrollo*, vol. 32, no. 2, pp. 369–396, Jun. 2014, doi: [10.14482/inde.32.2.4957](https://doi.org/10.14482/inde.32.2.4957).
- [18] M. Palacios Arauz, D. Figueroa Guerra, S. Puente Bosquez, and J. C. Pisco Vanegas, “On-grid photovoltaic system for self-supply of energy in a housing development,” *Boletín Científico Ideas Y Voces*, vol. 5, no. 1, pp. 75–89, Apr. 2025, doi: <https://doi.org/10.60100/bciv.v5i1.198>.
- [19] M. U. Hashmi, L. Pereira, and A. Bušić, “Energy Storage in Madeira, Portugal: Co-optimizing for Arbitrage, Self-Sufficiency, Peak Shaving and Energy Backup,” Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.00463>.
- [20] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), “Regulación Nro. ARCERNNR 002/20 (Codificada): Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica,” 2020, *Quito, Ecuador*.
- [21] A. Dixit, A. Saxena, R. Sharma, D. Behera, and S. Mukherjee, “Solar Photovoltaic Principles,” in *Solar PV Panels - Recent Advances and Future Prospects*, IntechOpen, 2023. doi: [10.5772/intechopen.109730](https://doi.org/10.5772/intechopen.109730).

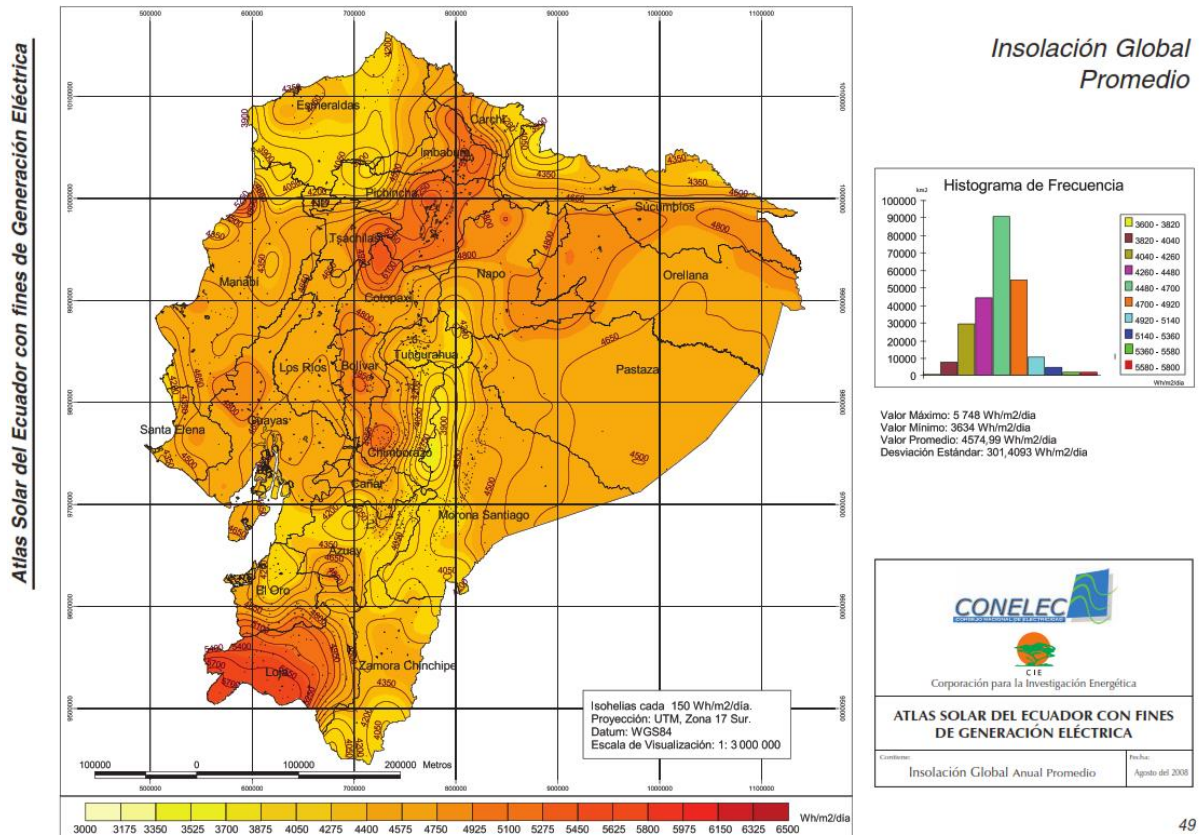
- [22] D. Barberá Santos, "Introducción a la Energía Fotovoltaica," 2018.
- [23] Solar Energy International, "Fotovoltaica - Manual de diseño e instalación. Una panorámica de la energía fotovoltaica," 2019.
- [24] G. F. Velasco and E. Cabrera, "Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura," 2009.
- [25] D. Vaca-Revelo and F. Ordóñez, "Mapa Solar del Ecuador 2019," 2019.
- [26] CONELEC, "ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA," Quito, Aug. 2008.
- [27] M. A. Green *et al.*, "Solar cell efficiency tables (version 59)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 30, no. 1, pp. 3–12, 2022, doi: 10.1002/pip.3506.
- [28] Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética, *MANUAL DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA SOLAR FOTOVOLTAICA*. 2019.
- [29] M. R. Pelaez Samaniego and J. L. Espinoza Abad, *Energías renovables del Ecuador - Situación actual, tendencias y perspectivas*, 1st ed. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca, 2015.
- [30] A. Villca Pozo and M. Villca Pozo, "Análisis del costo-beneficio de la instalación de paneles fotovoltaicos en edificios residenciales en Tarragona," *Revista Catalana de Dret Ambiental*, vol. 14, no. 1, 2023, doi: 10.17345/rcda3526.
- [31] Z. J. Čorba, V. A. Katić, B. P. Dumnić, and D. M. Milićević, "In-grid solar-to-electrical energy conversion system modeling and testing," *Thermal Science*, vol. 16, no. SUPPL. 1, 2012, doi: 10.2298/TSCI120224069C.
- [32] M. A. Chaaban, "Inverter types and classification," 2023, *Penn State - College of Earth and Mineral Sciences*. Accessed: Mar. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/ae868/node/904#:~:text=Considering%20the%20classification%20based%20on,and%20are%20used%20less%20often>
- [33] Pedro Francisco Garcia Martin, *Energía solar fotovoltaica para todos*, 1st ed. 2021.
- [34] R. F. Criollo Enríquez and D. P. Guailas Dominguez, "Estudio de prefactibilidad técnico-económica de la implementación de un sistema de generación distribuida fotovoltaica para el autoabastecimiento de energía eléctrica a los aularios del Eco-Campus Balzay de la Universidad de Cuenca," Universidad de Cuenca, Cuenca, 2024.
- [35] M. Hasan and H. Serra Altinoluk, "Current and future prospective for battery controllers of solar PV integrated battery energy storage systems," 2023, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fenrg.2023.1139255.
- [36] S. Tsianikas, J. Zhou, N. Yousefi, and D. W. Coit, "Battery selection for optimal grid-outage resilient photovoltaic and battery systems," Jan. 2019. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.11389>.

- [37] W. A. Alarcon Vanegas and S. Sánchez Jaimes, “Características de baterías para instalaciones de sistemas fotovoltaicos aislados en zonas rurales del departamento de Santander Colombia,” Oct. 2021.
- [38] S. Evro, A. Ajumobi, D. Mayon, and O. S. Tomomewo, “Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies,” *Future Batteries*, vol. 4, p. 100007, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.fub.2024.100007.
- [39] J. Jürgens, “This is why NCM is the preferable Cathode material for Li-ion batteries,” LG Energy Solution - ESS Battery Division. Accessed: Mar. 22, 2025. [Online]. Available: <https://lghomebatteryblog.eu/this-is-why-ncm-is-the-preferable-cathode-material-for-li-ion-batteries/#more>
- [40] V. Karthikeyan, S. Rajasekar, V. Das, P. Karuppanan, and A. K. Singh, “Grid-connected and off-grid solar photovoltaic system,” *Green Energy and Technology*, vol. 0, no. 9783319501963, pp. 125–157, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-50197-0\_5.
- [41] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones, “Energía Solar Fotovoltaica.” Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: [www.coit.es](http://www.coit.es)
- [42] Maysun Solar, “Off-Grid or On-Grid PV systems: Which to choose?,” Zhejiang, China. Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.maysunsolar.com/off-grid-or-on-grid-pv-systems/>
- [43] P. San Juan, “Tipos de instalaciones solares: on-grid, off-grid e híbridos,” SuriaEnergy. Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.suriaenergy.com/tipos-de-instalaciones-solares-ongrid-offgrid-e-hibridos>
- [44] Y. Salas Reyes, H. I. Gómez Blanco, M. Vanegas Chamorro, G. Valencia Ochoa, and E. Villicaña Ortiz, “Technical and economic design of a photovoltaic solar test bank for power generation off-grid,” *Prospectiva*, vol. 16, no. 2, pp. 82–88, Aug. 2018, doi: 10.15665/rp.v16i2.1653.
- [45] D. O. Cardozo Sarmiento and K. Y. Sánchez Mojica, “Diseño de un sistema fotovoltaico aislado para la generación de energía eléctrica en escuelas rurales de Norte de Santander,” *Gestión Ingenio y Sociedad*, vol. 2, no. 1, pp. 50–66, 2017, Accessed: Dec. 03, 2024. [Online]. Available: <http://gis.unicafam.edu.co/index.php/gis/article/view/43>
- [46] National Renewable Energy Laboratory, “NREL Mission and Vision.” Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/about/vision>
- [47] Empresa Electrica Regional CenroSur C.A., “Instructivo para el trámite de aprobación de diseños de instalaciones eléctricas interiores para demandas inferiores a 12 kW y cargas instaladas menores a 20 kVA.,” Nov. 2019.
- [48] J. Donis, “Calculo y selección de conductor y protecciones en un sistema fotovoltaico,” 2022.

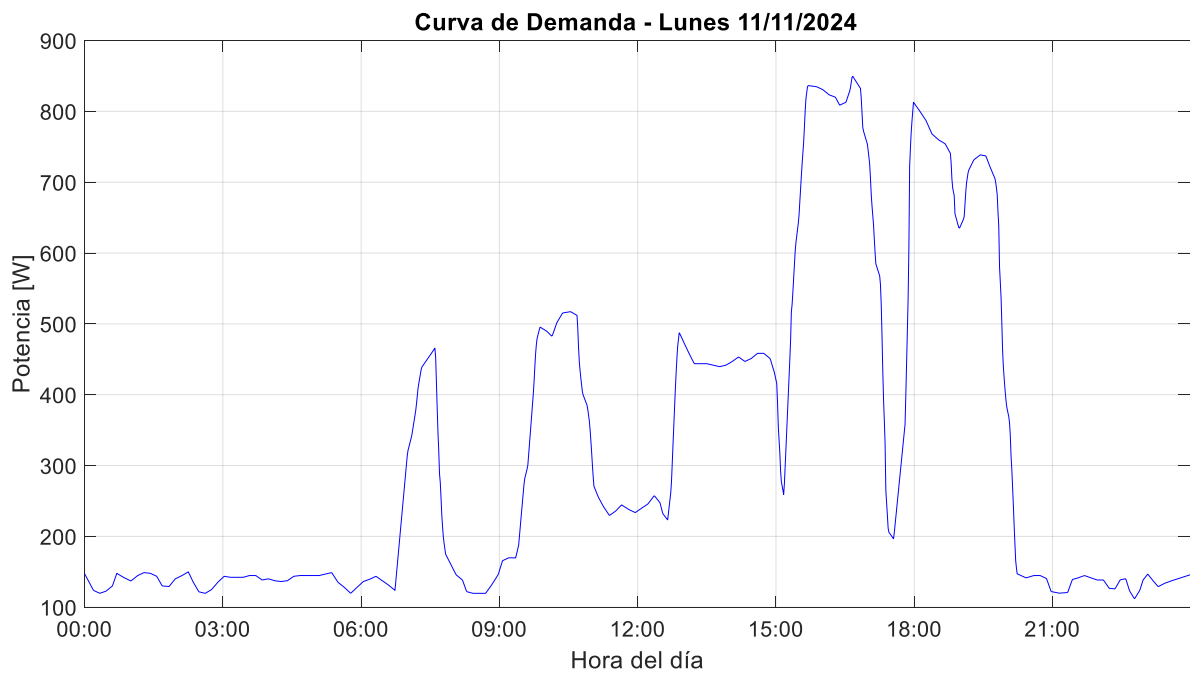
- [49] J. Miles, "DANDO CLARIDAD A LOS CÁLCULOS DE CONDUCTORES EN LOS SFV," 2020.
- [50] Ministerio del Desarrollo Urbano y Vivienda, "Norma Ecuatoriana de la Construcción - Instalaciones Eléctricas (NEC - SB - IE)," Feb. 2018.
- [51] D. Ochoa Correa, "Material didáctico de Generación Distribuida - Capítulo 3: Tecnologías de generación no convencional.," 2024, *Cuenca, Ecuador*.

Anexos

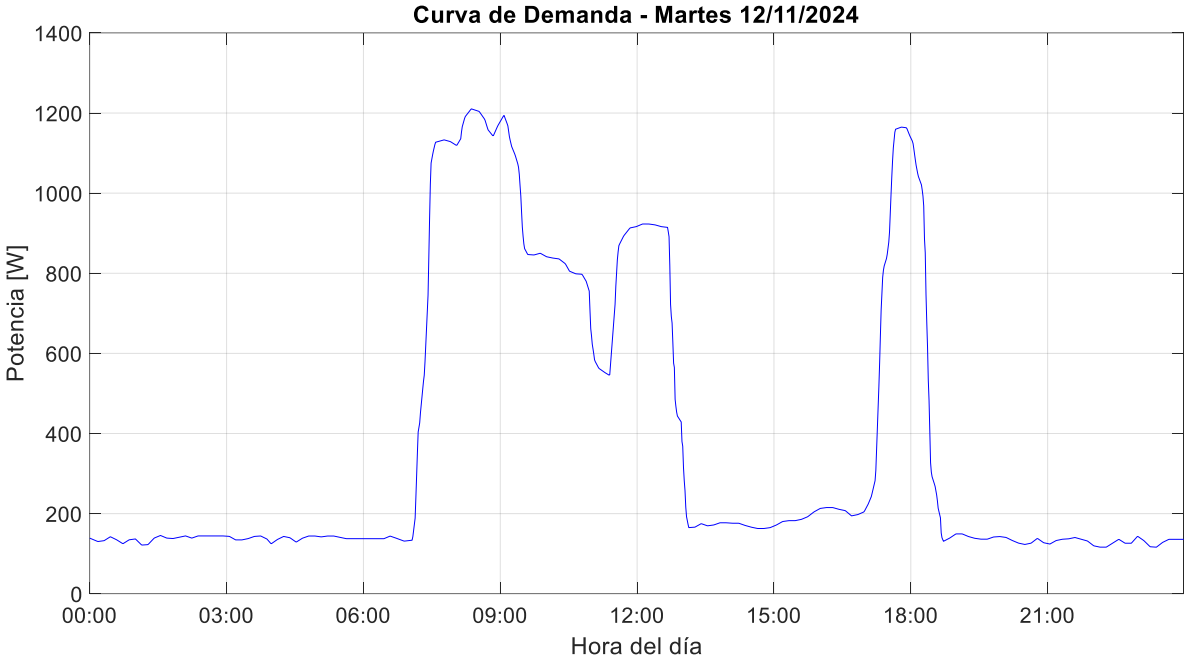
Anexo A. Insolación global promedio del Ecuador [26].



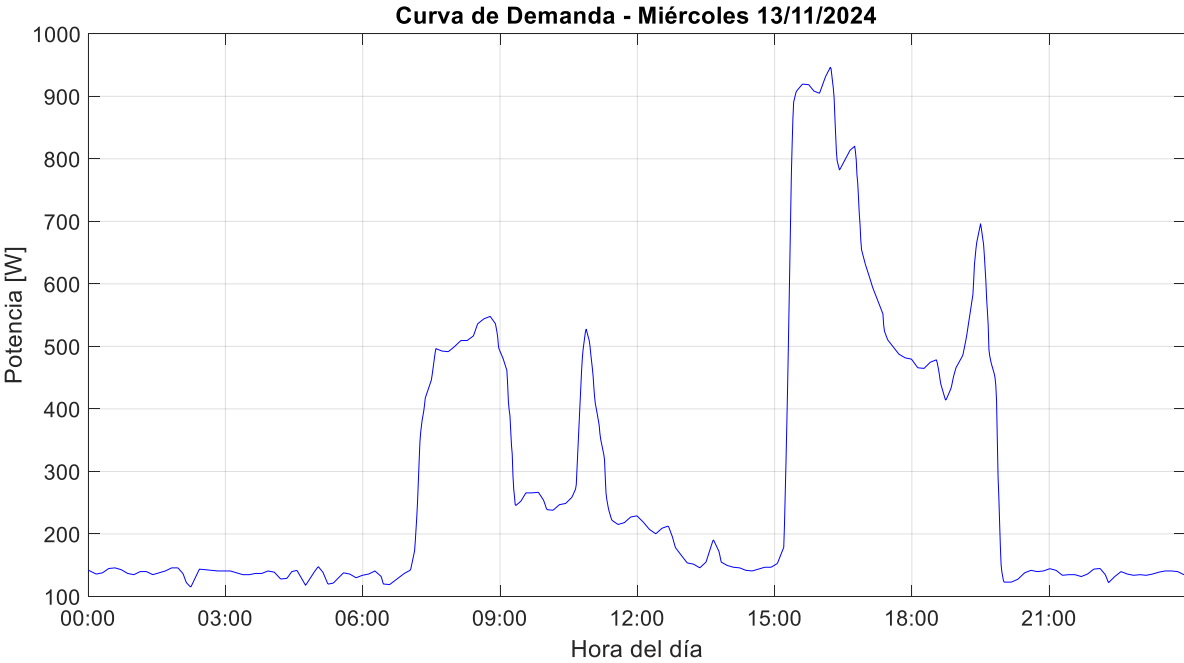
Anexo B. Curva de demanda energética del aula prototípica - lunes 11/11/2024. Fuente: elaboración propia (2025).



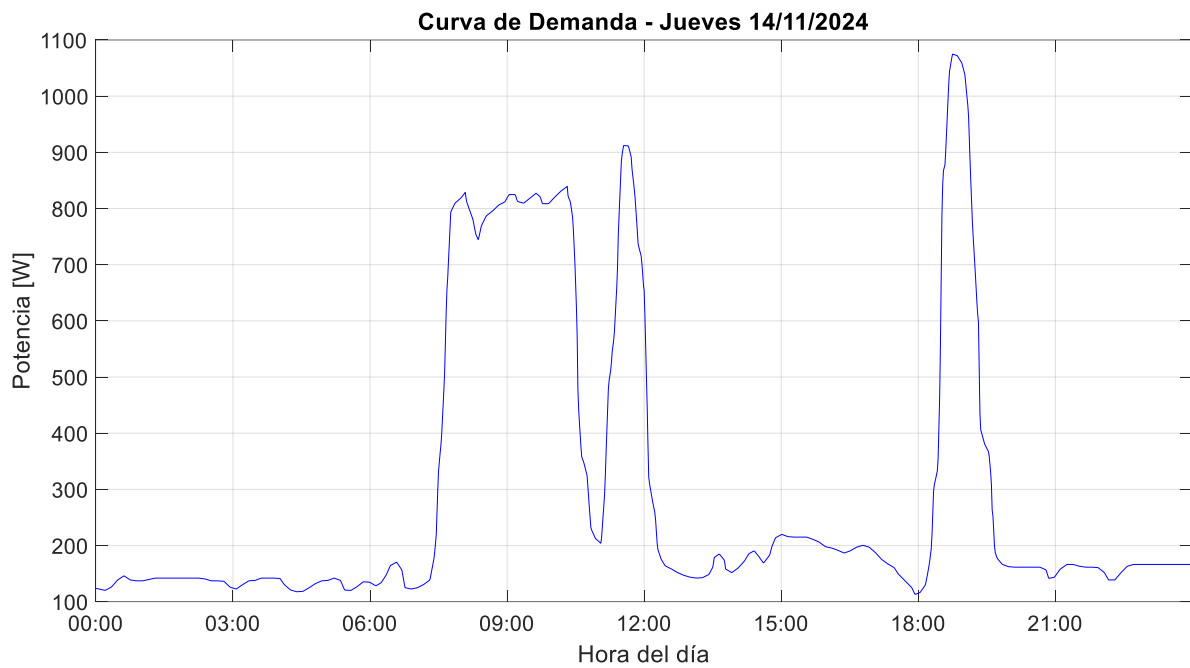
Anexo C. Curva de demanda energética del aula prototípica - martes 12/11/2024. Fuente: elaboración propia (2025).



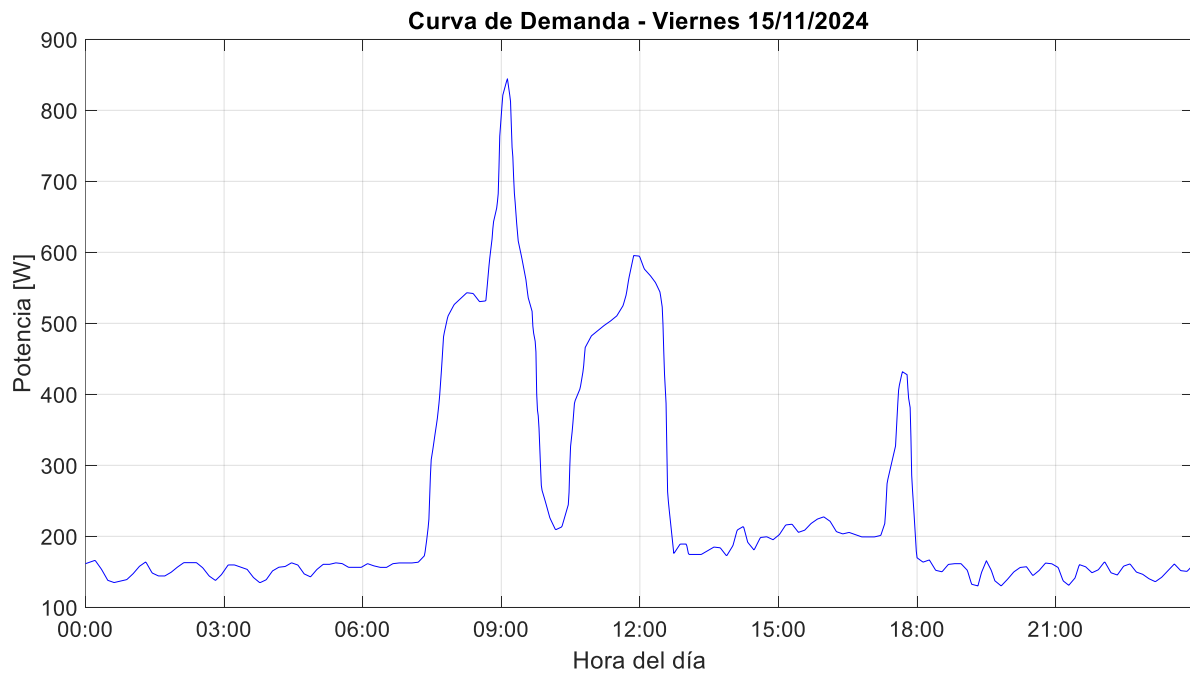
Anexo D. Curva de demanda energética del aula prototípica - miércoles 13/11/2024. Fuente: elaboración propia (2025).



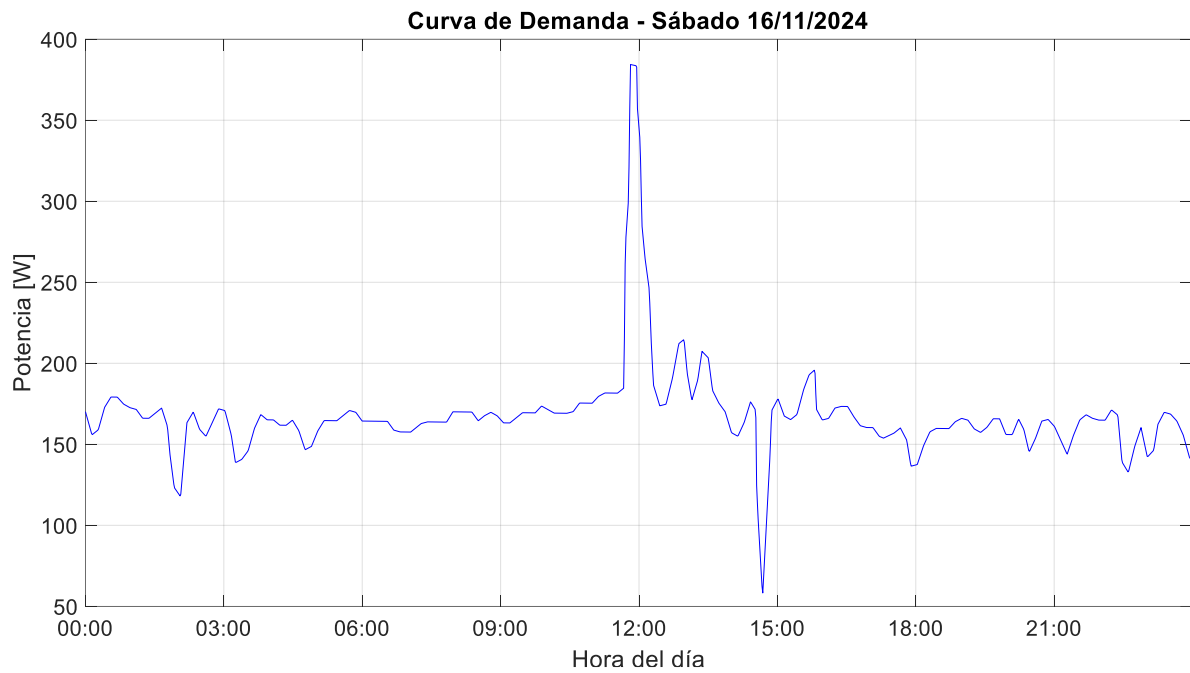
Anexo E. Curva de demanda energética del aula prototípica - jueves 14/11/2024. Fuente: elaboración propia (2025).



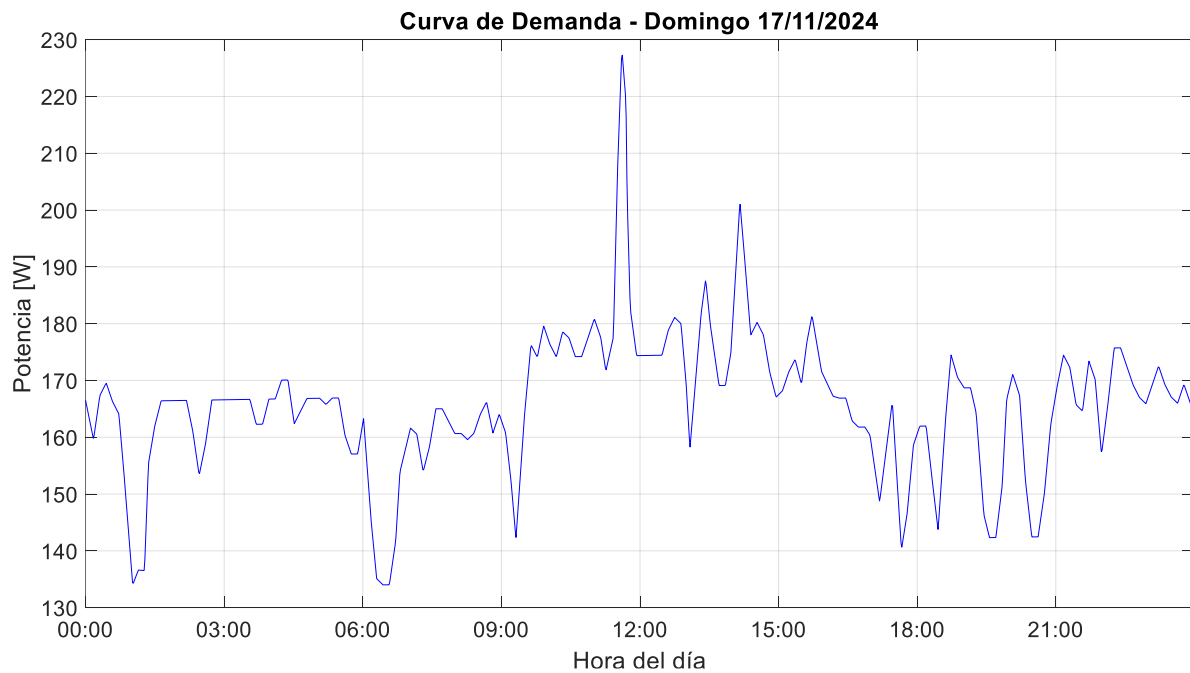
Anexo F. Curva de demanda energética del aula prototípica - viernes 15/11/2024. Fuente: elaboración propia (2025).



Anexo G. Curva de demanda energética del aula prototípica - sábado 16/11/2024. Fuente: elaboración propia (2025).

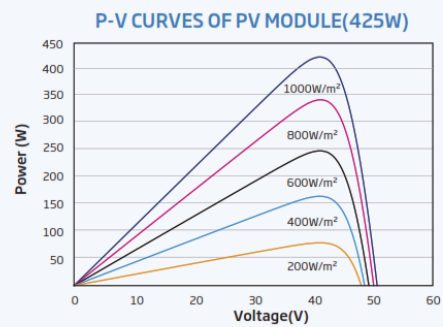
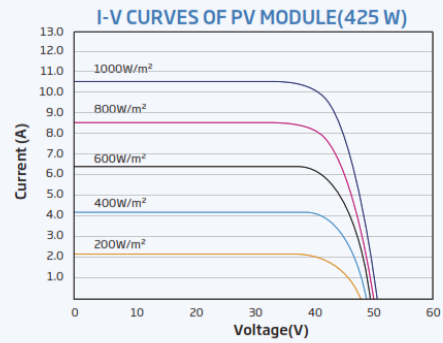
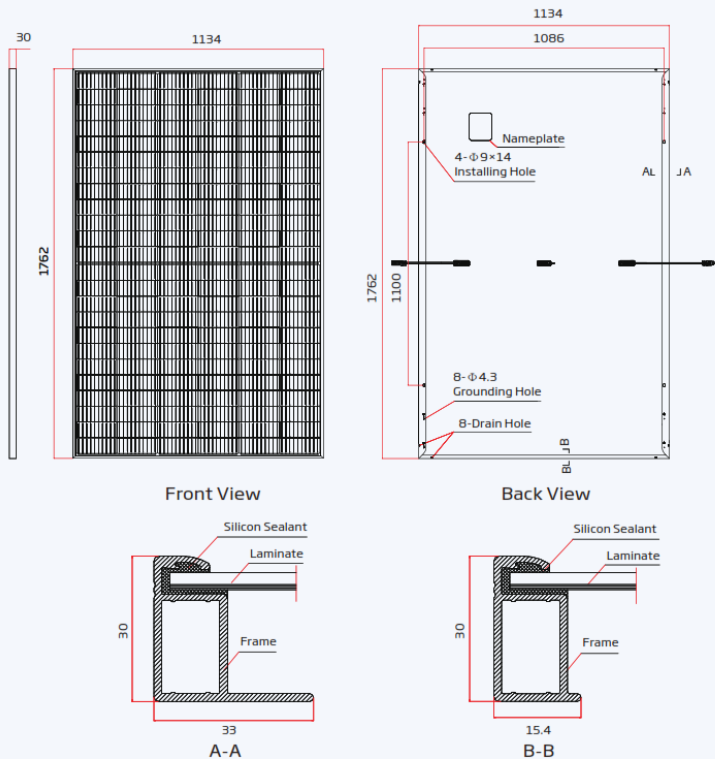


Anexo H. Curva de demanda energética del aula prototípica - domingo 17/11/2024. Fuente: elaboración propia (2025).



Anexo I. Captura de pantalla de la ficha técnica del panel fotovoltaico VERTEX TSM-DE09R-425.

**DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)**



**ELECTRICAL DATA (STC)**

Peak Power Watts- $P_{MAX}$ (Wp)*	415	420	425	430	435
Power Tolerance- $P_{MAX}$ (W)			0 ~ +5		
Maximum Power Voltage- $V_{MPP}$ (V)	41.7	42.0	42.2	42.3	42.5
Maximum Power Current- $I_{MPP}$ (A)	9.94	10.01	10.08	10.17	10.24
Open Circuit Voltage- $V_{OC}$ (V)	50.0	50.1	50.2	50.3	50.4
Short Circuit Current- $I_{SC}$ (A)	10.55	10.58	10.61	10.64	10.67
Module Efficiency $\eta_m$ (%)	20.8	21.0	21.3	21.5	21.8

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5. \*Measuring tolerance: ±3%.

**ELECTRICAL DATA (NOCT)**

Maximum Power- $P_{MAX}$ (Wp)	312	317	321	325	329
Maximum Power Voltage- $V_{MPP}$ (V)	38.7	39.2	39.5	39.7	40.0
Maximum Power Current- $I_{MPP}$ (A)	8.07	8.10	8.13	8.17	8.23
Open Circuit Voltage- $V_{OC}$ (V)	47.1	47.1	47.2	47.4	47.5
Short Circuit Current- $I_{SC}$ (A)	8.50	8.53	8.55	8.60	8.65

NOCT: Irradiance at 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

**MECHANICAL DATA**

Solar Cells	Monocrystalline
No. of cells	144 cells
Module Dimensions	1762×1134×30 mm (69.37×44.65×1.18 inches)
Weight	21.8 kg (48.1 lb)
Glass	3.2 mm (0.13 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	EVA/POE
Backsheet	White
Frame	30mm(1.18 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm <sup>2</sup> (0.006 inches <sup>2</sup> ), Portrait: 350/280 mm(13.78/11.02 inches) Length can be customized
Connector	MC4 EVO2 / TS4*

\*Please refer to regional datasheet for specified connector.

**TEMPERATURE RATINGS**

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	43°C (±2°C)
Temperature Coefficient of $P_{MAX}$	-0.34%/°C
Temperature Coefficient of $V_{OC}$	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of $I_{SC}$	0.04%/°C

**MAXIMUM RATINGS**

Operational Temperature	-40 ~ +85°C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
Max Series Fuse Rating	20A

**WARRANTY**

12 year Product Workmanship Warranty  
25 year Power Warranty  
2% first year degradation  
0.55% Annual Power Attenuation

(Please refer to product warranty for details)

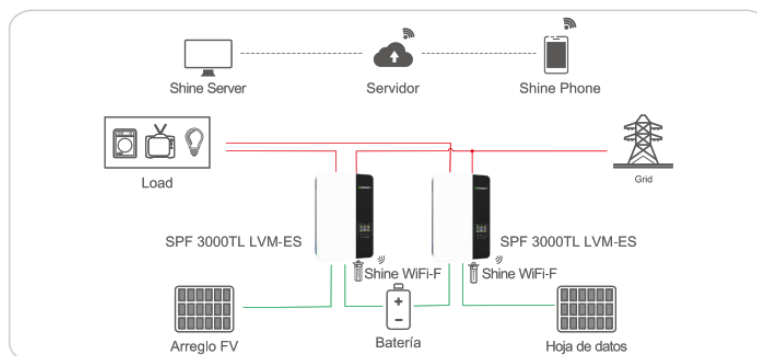
**PACKAGING CONFIGURATION**

Modules per box: 36 pieces  
Modules per 40' container: 936 pieces

Anexo J. Captura de pantalla de la ficha técnica del inversor GROWATT SPF 3000TL LVM-ES.

Hoja de Datos	SPF 3000TL LVM-ES
Voltaje de Batería	48VDC
Tipo de Batería	Litio/Plomo Acido
<b>Salida del Inversor</b>	
Potencia nominal	3000VA/ 3000W
Conexión en paralelo	Sí, 6 unidades máx
Voltaje de CA(Modo batería)	100Vac/110Vac/120Vac @ 50/60Hz
Sobretensión	6000VA
Eficiencia max	90%
Tipo de onda	Onda senoidal pura
Tiempo de transferencia	Usual 10ms, Max. 20 ms
<b>Cargador solar</b>	
Máxima potencia FV	4000W
Rango de voltaje del MPPT	120VDC ~ 250VDC
Número de MPPTs/Cadenas por MPPT	1/1
Max. Voltaje de circuito abierto FV	250VDC
Corriente máxima de carga	80A
<b>Cargador CA</b>	
Corriente de carga	40A
Voltaje de entrada CA	120VAC
Rangos de voltaje	95-140VAC (Para computadoras); 65-140VAC (Para electrodomésticos)
Rango de frecuencia	500hz/60hz (auto-detección)
<b>Datos generales</b>	
Protección Ambiental	IP20
Dimensiones (ancho/altura/profundidad)	320/470/135mm
Peso	12kg
<b>Entorno operativo</b>	
Humedad	5% a 95% Humedad Relativa(No condensada)
Temperatura de Operación	0°C - 50°C
Temperatura de almacenamiento	-15°C - 60°C

## Aplicación en paralelo de fase dividida



Anexo K. Ficha técnica del sistema de almacenamiento – Batería DEYE SE-G5.1 PRO-B.

Model		SE-G5.1 Pro-B
<b>Main Parameter</b>		
Battery Chemistry		LiFePO <sub>4</sub>
Built-in Circuit Breaker		125A 2P, 60Vdc
Capacity ( Ah )		100
Scalability		Max. 64 pcs pack ( 327kWh) in parallel ( Max. 32 pcs no external setup )
Nominal Voltage ( V )		51.2
Operating Voltage ( V )		43.2 ~ 57.6
Energy ( kWh )		5.12
Usable Energy ( kWh ) <sup>[1]</sup>		4.6
Charge / Discharge Current ( A ) <sup>[2]</sup>	Recommend	50
	Max	100
	Peak ( 2mins, 25°C )	150
<b>Other Parameter</b>		
Recommend Depth of Discharge		90%
Dimension ( W × H × D, mm )		440 × 133 × 540
Weight Approximate ( kg )		45
Master LED Indicator		5LED ( SOC : 20% ~ SOC100% ) , 3LED ( working, alarming, protecting )
IP Rating of Enclosure		IP20
Operating Temperature		Charge : 0~55°C ( Optional heating : -20°C ~ 55°C ), Discharge : -20°C~55°C
Storage Temperature		0°C ~ 35°C
Humidity		5% ~ 95%
Altitude		≤2000m
Cycle Life		≥6000 ( 25°C±2°C, 0.5C / 0.5C, 90%DOD, 70%EOL )
Installation		Wall-Mounted, Floor-Mounted, Rack-Mounted ( 19-inch standard cabinet, cabinet depth ≥600mm )
Communication Port		CAN2.0, RS485
Warranty Period <sup>[3]</sup>		10 years
Energy Throughput		16MWh@70%EOL
Certification		UN38.3, IEC62619, CE, UK, VDE 2510-50, CEI 0-21, FCC, UL1973, UL9540A

[1] DC Usable Energy, test conditions: 90% DOD, 0.5C charge & discharge at 25°C. System usable energy may vary due to system configuration parameters.

[2] The current is affected by temperature and SOC.

[3] Conditions apply, refer to Deye Warranty Letter.

## Typical Configuration

Support 12kW, 15kW inverters to connect the battery, and 3 to 12 batteries can be connected in parallel.

1 hour solution	3xSE+12kW Inverter	3xSE+15kW Inverter
2 hours solution	5xSE+12kW Inverter	6xSE+15kW Inverter
3 hours solution	8xSE+12kW Inverter	9xSE+15kW Inverter
4 hours solution	10xSE+12kW Inverter	12xSE+15kW Inverter



Anexo L. Capacidad de corriente permisible en conductores aislados hasta 2000V nominales y 60°C a 90°C. No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (directamente enterrados) y temperatura ambiente de 30 °C [50].

Sección Transversal	Temperatura nominal del conductor						Calibre
	60 °C	75 °C	90 °C	60 °C	75 °C	90 °C	
	Tipo S, TW, UF	Tipos FEPW, RH, RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Tipo TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-E, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Tipo TW, UF	Tipos RH, RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Tipo TBS, SA, SIS, THHN, THW-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
mm <sup>2</sup>	COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			AWG o kcmils
0.82	...	...	14	...	...	...	18
1.31	...	...	18	...	...	...	16
2.08	20	20	25	...	...	...	14
3.3	25	25	30	20	20	25	12
5.25	30	35	40	25	30	35	10
8.36	40	50	55	30	40	45	8
13.29	55	65	75	40	50	60	6
21.14	70	85	95	55	65	75	4
26.66	85	100	110	65	75	85	3
33.62	95	115	130	75	90	100	2
42.2	110	130	150	85	100	115	1
53.5	125	150	170	100	120	135	1/0
67.44	145	175	195	115	135	150	2/0
85.02	165	200	225	130	155	175	3/0
107.21	195	230	260	150	180	205	4/0
126.67	215	255	290	170	205	230	250
152.01	240	285	320	190	230	255	300
177.34	260	310	350	210	250	280	350
202.68	280	335	380	225	270	305	400
253.35	320	380	430	260	310	350	500

Anexo M. Capacidad de protección en función del calibre del conductor [50].

Calibre del conductor AWG	14	12	10	8	6
Capacidad máxima del interruptor (Amperios)	15/16	20	30/32	40	50

Anexo N. PVsyst - Recurso solar de la base de datos de la NREL NSRDB TMY (1998-2020).

Parámetros del sitio geográfico para CampusBalzay - Ucuena\_NREL\_TMY.SIT

Coordenadas geográficas | Datos meteo mensuales | Mapa interactivo

Sitio: **CampusBalzay - Ucuena (Ecuador)**

Fuente de datos: NREL NSRDB Typ. Met. Year PSMv3\_1998 to 2020

	Irradiación horizontal global kWh/m <sup>2</sup> /día	Irradiación difusa horizontal kWh/m <sup>2</sup> /día	Temperatura °C	Velocidad del viento m/s
Enero	5.15	2.56	14.8	1.97
Febrero	4.95	2.71	14.4	1.74
Marzo	4.66	2.78	14.1	1.86
Abril	4.69	2.35	14.2	1.85
Mayo	4.35	1.95	13.6	2.09
Junio	4.28	1.80	12.5	2.32
Julio	4.28	2.10	12.9	3.04
Agosto	4.46	2.49	12.9	3.09
Septiembre	4.72	2.40	13.7	2.66
Octubre	5.12	2.55	13.9	2.03
Noviembre	5.56	2.37	14.0	1.23
Diciembre	5.37	2.46	14.6	1.92
<b>Año</b> ?	<b>4.80</b>	<b>2.38</b>	<b>13.8</b>	<b>2.2</b>
	Pegar	Pegar	Pegar	Pegar

**Datos requeridos**

Irradiación horizontal global

Temperatura ext. promedio

**Datos adicionales**

Irradiación difusa horizontal

Velocidad del viento

Turbidez Linke

Humedad relativa

**Unidades de irradiación:**

kWh/m<sup>2</sup>/día

kWh/m<sup>2</sup>/mes

MJ/m<sup>2</sup>/día

MJ/m<sup>2</sup>/mes

W/m<sup>2</sup>

Índice de claridad Kt