



Facultad de Ciencia y Tecnología

Tecnología Superior en Electricidad

Título

Diseño de un sistema de iluminación led alimentado por Energía Solar
fotovoltaica y almacenamiento en baterías de ion litio.

Trabajo previo a la obtención del título de Tecnólogo/a Superior en
Electricidad

Brenda Elizabeth Jiménez Torres

Director: Ing. Efrén Fernández

Cuenca – Ecuador

2026

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a Dios, por ser mi guía constante, por brindarme fortaleza, sabiduría y la oportunidad de culminar esta importante etapa de mi vida.

A mi madre, por ser un amor incondicional, su apoyo permanente y por ser el pilar fundamental en mi formación personal y académica. Gracias por la confianza, sus enseñanzas y por motivarme a alcanzar cada una de mis metas.

A mis padrinos, a quienes expreso mi más sincero agradecimiento por el apoyo generoso e incondicional.

Este logro también les pertenece.

Agradecimientos

Me agradezco a mí misma por no rendirme, por el esfuerzo, la constancia y la valentía de seguir adelante a pesar de las dificultades.

Este logro es el resultado de mi dedicación y perseverancia.

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el diseño de un sistema de iluminación LED alimentado por energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio; la propuesta se sitúa dentro de la integración de tecnologías energéticas que buscan mejorar el uso de la energía y mantener continuidad en el suministro bajo condiciones variables. La articulación entre generación, almacenamiento y consumo permite analizar el comportamiento del sistema como un conjunto interdependiente, más que como elementos aislados. El objetivo se orienta al diseño de un sistema capaz de optimizar el uso de la energía y sostener el suministro eléctrico mediante la combinación de paneles solares, baterías de litio y luminarias LED; se busca establecer una configuración técnica que responda a condiciones reales de operación y variabilidad del recurso solar. En cuanto a los métodos, se adopta un enfoque cuantitativo de tipo aplicado; se realiza el análisis de la demanda energética del sistema de iluminación, la evaluación del recurso solar mediante datos de radiación, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico y del almacenamiento energético, así como la integración de los componentes y el análisis del balance energético. El procedimiento se desarrolla en fases secuenciales que permiten estructurar el diseño técnico del sistema. Los resultados muestran un consumo energético de 720 Wh/día y una generación estimada de 900 Wh/día; el sistema fotovoltaico se compone de 2 paneles de 100 Wp, mientras que el almacenamiento se establece en 150 Ah a 12 V, garantizando una autonomía de 2 días. El balance energético presenta un excedente del 25 %, lo que permite compensar pérdidas y mantener estabilidad en la operación del sistema. Se concluye que el sistema diseñado presenta coherencia entre sus componentes; la generación cubre la demanda, el

almacenamiento asegura continuidad y la eficiencia del sistema de iluminación reduce el consumo energético. Esta integración permite un funcionamiento estable bajo condiciones promedio, evidenciando la viabilidad técnica del diseño propuesto.

Palabras clave: energía solar fotovoltaica; iluminación LED; baterías de litio; sistema autónomo; eficiencia energética

ABSTRACT

This study presents the design of a LED lighting system powered by photovoltaic solar energy with lithium battery storage; the proposal is framed within the integration of energy technologies aimed at improving energy use and maintaining supply continuity under variable conditions. The interaction between generation, storage, and consumption allows the system to be analyzed as an interdependent structure rather than isolated components. The objective focuses on designing a system capable of optimizing energy use and sustaining electrical supply through the integration of solar panels, lithium batteries, and LED lighting; the design seeks to establish a technical configuration that responds to real operating conditions and solar variability. Regarding methods, a quantitative and applied approach is adopted; the study includes load analysis, solar resource evaluation, photovoltaic system sizing, storage system dimensioning, system integration, and energy balance analysis. The procedure follows sequential phases to structure the technical design of the system. The results indicate an energy demand of 720 Wh/day and a generation of 900 Wh/day; the photovoltaic system consists of two 100 Wp panels, while storage is defined as 150 Ah at 12 V, providing a two-day autonomy. The energy balance shows a 25% surplus, ensuring system stability and compensation for losses. It is concluded that the proposed system presents technical coherence; generation exceeds demand, storage ensures continuity, and LED efficiency reduces energy consumption. This integration supports stable operation under average conditions, demonstrating the technical feasibility of the proposed design.

Keywords: photovoltaic solar energy; LED lighting; lithium batteries; autonomous system; energy efficiency

TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN	1
Contexto	1
Problemática	3
Justificación	4
MARCO TEÓRICO	6
Energía y transición hacia sistemas sostenibles	6
Concepto de energía eléctrica y demanda energética	6
Evolución del consumo energético en edificaciones	7
Integración de energías renovables en sistemas eléctricos	8
Energía solar fotovoltaica	10
Principio de funcionamiento del efecto fotovoltaico	10
Componentes de un sistema fotovoltaico	10
Tipos de sistemas fotovoltaicos (aislados, conectados a red, híbridos)	11
Factores que afectan la generación fotovoltaica	12
Sistemas de almacenamiento energético	13
Importancia del almacenamiento en sistemas renovables	13
Tipos de almacenamiento energético	14
Parámetros técnicos del almacenamiento energético	15
Baterías de litio	16
Funcionamiento de las baterías de litio	16
Tipos de baterías de litio (Li-ion, LiFePO ₄ , etc.)	17

Ventajas y limitaciones frente a otras baterías	18
Factores que afectan el rendimiento y la vida útil	19
Iluminación LED y eficiencia energética	19
Principio de funcionamiento de la tecnología LED	19
Eficiencia energética y vida útil	20
Comparación con tecnologías tradicionales	21
Aplicaciones en sistemas autónomos	22
Sistemas de iluminación solar fotovoltaica y dimensionamiento energético	22
Integración de paneles solares, baterías y luminarias LED	22
Tipos de sistemas y componentes integrados	23
Dimensionamiento del sistema y balance energético	24
<i>OBJETIVOS</i>	25
General	25
Específicos	25
Alcances	25
<i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>	26
Materiales	26
Métodos	26
Enfoque y tipo de investigación	26
Diseño de la investigación	27
Técnicas e instrumentos de recolección de datos	27
Variables de estudio	28
Fases de la investigación y procedimientos	28
Procedimiento	29
<i>RESULTADOS</i>	31
Resultados del análisis de la demanda energética	32

Descripción de cargas (luminarias LED).....	32
Cálculo de consumo por unidad.....	32
Resultados de la evaluación del recurso solar.....	34
Datos de radiación solar del sitio.....	34
Horas pico solares.....	35
Variabilidad diaria.....	35
Resultados del dimensionamiento del sistema fotovoltaico.....	37
Energía requerida vs energía generada.....	37
Número de paneles necesarios.....	38
Potencia total instalada.....	38
Resultados del dimensionamiento del sistema de almacenamiento.....	40
Energía a almacenar.....	40
Capacidad de baterías (Ah / Wh).....	40
Autonomía del sistema.....	41
Resultados de la integración del sistema.....	42
Configuración final del sistema.....	42
Flujo energético.....	43
Validación técnica del diseño.....	43
Resultados del balance energético.....	45
Comparación generación vs consumo.....	45
Identificación de excedentes o déficits.....	46
Evaluación de estabilidad del sistema.....	46
<i>CONCLUSIONES</i>	52
<i>REFERENCIAS</i>	53
<i>ANEXOS</i>	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación entre fuentes de energía (convencionales vs renovables).....	8
Tabla 2 Componentes de un sistema fotovoltaico y sus funciones.....	11
Tabla 3 Comparación entre tecnologías de almacenamiento energético.....	14
Tabla 4 Características técnicas de baterías de litio vs plomo-ácido.....	17
Tabla 5 Comparación entre tecnologías de iluminación (LED, fluorescente, incandescente).....	20
Tabla 6 Configuración de sistemas de iluminación solar según aplicación.....	23
Tabla 7 Consumo energético del sistema de iluminación.....	33
Tabla 8 Radiación solar promedio.....	35
Tabla 9 Dimensionamiento de paneles solares.....	39
Tabla 10 Dimensionamiento de baterías.....	41
Tabla 11 Configuración del sistema.....	43
Tabla 12 Balance energético del sistema.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tendencia del consumo energético global y participación de energías renovables	9
Figura 2 Esquema de funcionamiento de un sistema fotovoltaico	12
Figura 3 Relación entre generación solar y almacenamiento energético	16
Figura 4 Ciclo de carga y descarga de una batería de litio	18
Figura 5 Consumo energético comparado entre sistemas de iluminación	21
Figura 6 Diagrama de un sistema de iluminación LED con energía solar y baterías	24
Figura 7 Procedimiento	29
Figura 8 Distribución del consumo energético	34
Figura 9 Comportamiento de la radiación solar	37
Figura 10 Relación generación–demanda	39
Figura 11 Capacidad vs autonomía	42
Figura 12 Diagrama final del sistema	44
Figura 13 Diseño del sistema con iluminación LED	45
Figura 14 Balance energético diario	47
Figura 15 Simulación en PVsyst (PRO)	48

INTRODUCCIÓN

Contexto

La forma en que se produce, gestiona y utiliza la energía eléctrica atraviesa una transformación sostenida; la presión por reducir emisiones, junto con la expansión de la demanda energética, ha impulsado soluciones que combinan generación distribuida, almacenamiento y consumo eficiente en un mismo sistema. En ese escenario, los sistemas fotovoltaicos aparecen como una alternativa ampliamente explorada, no solo por su capacidad de conversión directa de radiación solar en electricidad, sino por su adaptabilidad a configuraciones autónomas o híbridas; aun así, su comportamiento intermitente mantiene abierto el debate sobre la continuidad del suministro, especialmente en aplicaciones donde la disponibilidad energética condiciona el funcionamiento operativo (Hasan & Serra Altinoluk, 2023; Ren et al., 2022).

La discusión no se limita a la generación; el almacenamiento energético emerge como un componente que redefine el desempeño global del sistema, ya que permite desacoplar los momentos de producción y consumo. En este punto, las baterías de litio han ganado presencia debido a su densidad energética, estabilidad operativa y menores requerimientos de mantenimiento frente a tecnologías convencionales; según Chung (2024), estos sistemas han mostrado comportamientos favorables en aplicaciones aisladas, donde la red eléctrica no está disponible y la continuidad depende de la gestión interna del sistema . Sin embargo, el uso extendido de estas tecnologías también abre interrogantes sobre su vida útil, su eficiencia real en condiciones variables y los criterios de diseño que permiten aprovechar su potencial sin comprometer la sostenibilidad del sistema.

En paralelo, el desarrollo de sistemas de iluminación ha seguido una trayectoria distinta pero complementaria; la incorporación de tecnología LED ha reducido de manera considerable el consumo energético en comparación con sistemas tradicionales, lo que modifica el dimensionamiento requerido de los sistemas de generación y almacenamiento. Sulaiman et al. (2024) plantean que la integración de iluminación LED con control automático y suministro fotovoltaico permite ajustar el consumo a condiciones reales de uso, evitando desperdicios y optimizando el rendimiento energético global ; esta relación entre eficiencia del consumo y autonomía energética

introduce una lógica de diseño donde cada componente influye directamente en el comportamiento del conjunto.

A partir de estas convergencias tecnológicas, comienzan a configurarse sistemas integrados que combinan paneles solares, almacenamiento en baterías de litio y cargas de bajo consumo como la iluminación LED; Kumar et al. (2025) describen configuraciones donde incluso se incorporan capacidades de monitoreo mediante IoT, lo que permite observar el sistema en tiempo real y ajustar su funcionamiento según patrones de uso. Esta evolución no solo responde a criterios técnicos; también refleja una tendencia hacia sistemas energéticos descentralizados, capaces de operar de forma autónoma y adaptativa.

Lo que se observa, entonces, no es únicamente la coexistencia de tecnologías, sino una articulación progresiva entre generación, almacenamiento y consumo; dicha articulación plantea preguntas sobre cómo diseñar sistemas que mantengan estabilidad, eficiencia y viabilidad en escenarios reales de operación. La iluminación LED alimentada por energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio se ubica precisamente en ese punto de intersección; no como una solución aislada, sino como una propuesta que condensa varias líneas de desarrollo energético en un solo sistema, cuya comprensión requiere analizar la interacción entre sus componentes más que su funcionamiento individual.

Problemática

El consumo eléctrico mantiene una tendencia creciente en distintos sectores; la expansión de edificaciones, junto con el uso continuo de dispositivos eléctricos, incrementa la demanda energética diaria. Dentro de este consumo, la iluminación ocupa una proporción relevante; se estima que puede representar entre el 15 % y el 30 % del total en edificaciones, variando según el tipo de uso y los hábitos operativos. Al mismo tiempo, la energía solar fotovoltaica ha mostrado un crecimiento sostenido impulsado por la reducción de costos cercana al 85 % en la última década, lo que ha favorecido su incorporación en sistemas energéticos descentralizados (Ren et al., 2022); aun así, la generación depende de la radiación disponible, lo que introduce variaciones diarias y estacionales que afectan la continuidad del suministro. Hasan y Serra Altinoluk (2023) indican que los sistemas fotovoltaicos no pueden cubrir la demanda de forma constante sin apoyo de almacenamiento, debido a su carácter intermitente .

La incorporación de almacenamiento energético mediante baterías de litio busca compensar estas fluctuaciones; su uso se ha extendido por su alta densidad energética y menores pérdidas en comparación con tecnologías convencionales. Sin embargo, su desempeño está condicionado por variables operativas; Chung (2024) reporta que, en sistemas autónomos con varios años de funcionamiento, factores como la temperatura, la tasa de carga y los ciclos acumulados inciden en la degradación del sistema y en la reducción progresiva de su capacidad útil . A ello se suma el costo inicial de implementación, que continúa siendo superior al de otras alternativas, lo que limita su adopción en aplicaciones de menor escala; además, la eficiencia del sistema depende en gran medida de la estrategia de control y del dimensionamiento de sus componentes.

En relación con el consumo, la adopción de iluminación LED ha permitido reducciones superiores al 60 % en comparación con tecnologías tradicionales, lo que modifica la demanda energética de los sistemas de iluminación (Sulaiman et al., 2024); no obstante, el uso ineficiente persiste en múltiples espacios. Se han identificado situaciones donde las luminarias permanecen encendidas durante periodos sin ocupación, generando consumo innecesario que se acumula a lo largo de la jornada; esta condición evidencia una desconexión entre la demanda real de iluminación y la forma en que se gestiona el suministro energético, especialmente cuando no se incorporan sistemas de control automatizado.

La problemática se intensifica al analizar la interacción entre generación, almacenamiento y consumo; en muchos casos, estos elementos se diseñan de manera independiente, lo que dificulta su funcionamiento coordinado. Un dimensionamiento inadecuado puede generar sobredimensionamiento de paneles, subutilización del almacenamiento o interrupciones en el suministro; Ren et al. (2022) señalan que estas decisiones de diseño inciden directamente en la eficiencia energética y en el costo del sistema. A su vez, la variabilidad de la generación solar y la degradación progresiva de las baterías introducen incertidumbre en el rendimiento a lo largo del tiempo, lo que afecta la estabilidad operativa.

Se observa, entonces, una coexistencia de avances tecnológicos en generación fotovoltaica, almacenamiento en baterías de litio y eficiencia en iluminación LED; aun así, la falta de integración técnica, el uso poco eficiente de la energía y las limitaciones en el diseño generan pérdidas energéticas, incrementos en costos y discontinuidades en el servicio. Estas condiciones permiten delimitar el problema hacia la articulación de los componentes del sistema, considerando su interacción y comportamiento en operación real. A partir de ello, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar un sistema de iluminación LED alimentado por energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio que optimice el uso de la energía, garantice continuidad en el suministro y mejore la eficiencia operativa del sistema?

Justificación

La relación entre generación energética, almacenamiento y consumo ha comenzado a redefinir la manera en que se conciben los sistemas eléctricos; ya no se trata únicamente de producir energía, sino de administrarla con criterios de eficiencia, continuidad y adaptación a condiciones reales de uso. En este sentido, la iluminación, al representar una proporción relevante del consumo en edificaciones, se convierte en un punto estratégico de intervención; la incorporación de tecnología LED ha demostrado reducciones superiores al 60 % en el consumo energético, lo que permite replantear el dimensionamiento de los sistemas eléctricos y disminuir la carga sobre las fuentes de generación (Sulaiman et al., 2024). Esta reducción no solo impacta en el consumo inmediato; también incide en la escala de los sistemas fotovoltaicos requeridos, generando configuraciones más compactas y manejables.

Al mismo tiempo, la integración de energía solar fotovoltaica introduce una alternativa viable para la generación distribuida; su crecimiento sostenido y la disminución de costos han favorecido su implementación en distintos entornos. Ren et al. (2022) destacan que la reducción de costos cercana al 85 % en sistemas fotovoltaicos ha ampliado su accesibilidad, permitiendo su uso en aplicaciones que antes dependían exclusivamente de la red eléctrica ; sin embargo, su comportamiento variable mantiene la necesidad de incorporar sistemas de almacenamiento que permitan estabilizar el suministro. En este punto, las baterías de litio aportan características operativas que mejoran la disponibilidad energética, al ofrecer mayor densidad energética y menores pérdidas frente a tecnologías tradicionales (Chung, 2024); su integración adecuada permite aprovechar de forma más consistente la energía generada durante el día y extender su uso en horarios sin radiación solar.

La importancia de articular estos tres componentes generación, almacenamiento y consumo eficiente radica en su capacidad de funcionar como un sistema integrado; cuando se diseñan de manera aislada, aparecen ineficiencias que limitan su desempeño. Hasan y Serra Altinoluk (2023) señalan que la gestión energética y los sistemas de control influyen directamente en la eficiencia y estabilidad de los sistemas fotovoltaicos con almacenamiento ; por lo tanto, el valor no se encuentra únicamente en cada tecnología por separado, sino en la forma en que interactúan. Esta interacción permite reducir pérdidas energéticas, mejorar la continuidad del servicio y optimizar el uso de los recursos disponibles, lo que adquiere relevancia en entornos donde el acceso a la energía no es constante o donde los costos operativos deben mantenerse controlados.

A nivel técnico, el aporte se orienta hacia la comprensión del comportamiento conjunto de estos sistemas; analizar cómo se relacionan el dimensionamiento fotovoltaico, la capacidad de almacenamiento y la demanda de iluminación permite establecer criterios más precisos para su diseño. Esto implica considerar variables como perfiles de carga, condiciones de radiación, ciclos de almacenamiento y patrones de uso, elementos que influyen directamente en el rendimiento del sistema. A nivel práctico, la aplicación de este tipo de soluciones permite reducir la dependencia de la red eléctrica convencional, mejorar la eficiencia energética en espacios específicos y ampliar las posibilidades de electrificación en zonas con acceso limitado a infraestructura energética.

MARCO TEÓRICO

Energía y transición hacia sistemas sostenibles

Concepto de energía eléctrica y demanda energética

La energía eléctrica se entiende como la capacidad de realizar trabajo a partir del movimiento de cargas eléctricas; su relevancia se asocia con su facilidad de transporte, transformación y uso en múltiples aplicaciones. Fokeev et al. (2019) explican que la planificación de sistemas eléctricos depende directamente del cálculo de cargas, donde la demanda se configura como un indicador que refleja el consumo en función del tiempo y del tipo de usuario; esta visión técnica se complementa con Stanley y Kingsley (2021), quienes relacionan la demanda energética con el uso de equipos eléctricos alimentados por sistemas convencionales o sostenibles, evidenciando que el incremento en dispositivos eléctricos amplía la presión sobre los sistemas de generación.

Ahora bien, la demanda energética no responde únicamente a variables técnicas; también se encuentra influenciada por patrones de consumo y condiciones socioeconómicas. Choubey et al. (2024) sostienen que el uso de datos masivos en edificaciones permite identificar comportamientos de consumo y optimizar la eficiencia energética; mientras tanto, Yu et al. (2021) (p. 12047) vinculan la gestión inteligente de la energía con el aprendizaje automático, señalando que los sistemas modernos permiten ajustar la demanda en tiempo real según condiciones operativas. Estas perspectivas no coinciden en su metodología, aunque convergen en un punto; la demanda energética ya no se interpreta como un valor estático, sino como un fenómeno dinámico que puede gestionarse mediante tecnología.

A partir de ello, la energía eléctrica se posiciona como un elemento transversal en la vida cotidiana; su uso intensivo en iluminación, climatización y dispositivos electrónicos incrementa la carga sobre los sistemas energéticos. Ajagbe et al. (2024) plantean que la automatización doméstica mediante IoT permite controlar el consumo eléctrico en tiempo real, lo que introduce una relación más directa entre usuario y sistema energético; en contraste, Bhagyasri et al. (2023) muestran que, sin sistemas de control, el consumo se mantiene constante independientemente de la necesidad real, lo que deriva en desperdicio energético. Esta comparación permite entender que la

demanda no solo depende de la cantidad de energía disponible, sino también de cómo se gestiona su uso.

Evolución del consumo energético en edificaciones

El consumo energético en edificaciones ha experimentado cambios asociados al crecimiento urbano y a la incorporación de tecnologías eléctricas; este incremento no se distribuye de manera uniforme, ya que ciertos usos, como la iluminación, representan una proporción considerable del consumo total. Sejati y Dewi (2024) indican que los sistemas de iluminación artificial influyen directamente en el consumo energético de edificaciones educativas, especialmente cuando no se aplican criterios de eficiencia; por su parte, Seyitoğlu et al. (2023) evidencian que la sustitución de sistemas tradicionales por iluminación LED puede reducir el consumo en más del 60 %, lo que muestra una diferencia notable en el comportamiento energético de las edificaciones.

En esa misma línea, Morais et al. (2024) relacionan la innovación tecnológica con la sostenibilidad en instituciones educativas, destacando que la implementación de soluciones eficientes modifica la estructura del consumo energético; mientras tanto, Dubrovskaya y Havrylenko (2023) analizan el uso de sistemas solares en instalaciones públicas, señalando que la eficiencia energética depende tanto de la tecnología utilizada como de la forma en que se integra al sistema existente. Ambas posturas coinciden en la importancia de la tecnología, aunque difieren en su énfasis; una se orienta hacia la innovación institucional y la otra hacia la eficiencia técnica.

El crecimiento del consumo también se vincula con la falta de control en los sistemas eléctricos; Sharkawy et al. (2022) señalan que la automatización en edificaciones permite reducir el consumo innecesario mediante el control de dispositivos, mientras que Kalpana et al. (2024) destacan que la integración de sistemas inteligentes facilita la optimización del uso energético. Aun así, en muchos casos, los sistemas operan sin control automatizado; esta condición mantiene un consumo constante incluso cuando no existe demanda real, lo que incrementa el gasto energético. De esta forma, la evolución del consumo no solo responde al aumento en el uso de energía, sino también a la forma en que se administran los sistemas eléctricos dentro de las edificaciones.

Integración de energías renovables en sistemas eléctricos

La incorporación de energías renovables en sistemas eléctricos responde a la búsqueda de alternativas frente a las limitaciones de las fuentes convencionales; entre estas, la energía solar fotovoltaica se posiciona como una opción ampliamente adoptada debido a su disponibilidad y capacidad de conversión directa. Pandey et al. (2022) explican que la energía solar puede aprovecharse mediante métodos directos, como los sistemas fotovoltaicos, o indirectos, lo que amplía sus aplicaciones en distintos sectores; de manera complementaria, Li et al. (2022) destacan que el potencial de despliegue de la energía solar continúa en expansión, lo que refuerza su presencia en sistemas energéticos modernos.

Sin embargo, la integración de estas fuentes no está exenta de limitaciones; Halkos y Gkampoura (2020) señalan que las energías renovables presentan variabilidad en su generación, lo que dificulta su incorporación sin sistemas de apoyo; en contraste, Etukudoh et al. (2024) plantean que la innovación en el diseño de sistemas solares permite mejorar su eficiencia y facilitar su integración en entornos urbanos. Estas posturas reflejan una diferencia en el análisis; una enfatiza las limitaciones inherentes de la tecnología y la otra resalta las mejoras derivadas del desarrollo técnico.

En aplicaciones concretas, Jatav et al. (2023) analizan sistemas fotovoltaicos en edificaciones, mostrando que su implementación permite reducir la dependencia de la red eléctrica; a su vez, Khairi y Akimoto (2022) sostienen que los sistemas solares en edificios educativos contribuyen a la sostenibilidad energética, especialmente cuando se integran en la infraestructura existente. Zakri et al. (2023) amplían esta idea al proponer sistemas de iluminación pública alimentados por energía solar, lo que evidencia su aplicabilidad en distintos escenarios. A pesar de estas ventajas, la variabilidad de la generación mantiene la necesidad de complementar estos sistemas con almacenamiento energético, lo que introduce una relación directa entre generación, almacenamiento y consumo dentro del sistema eléctrico.

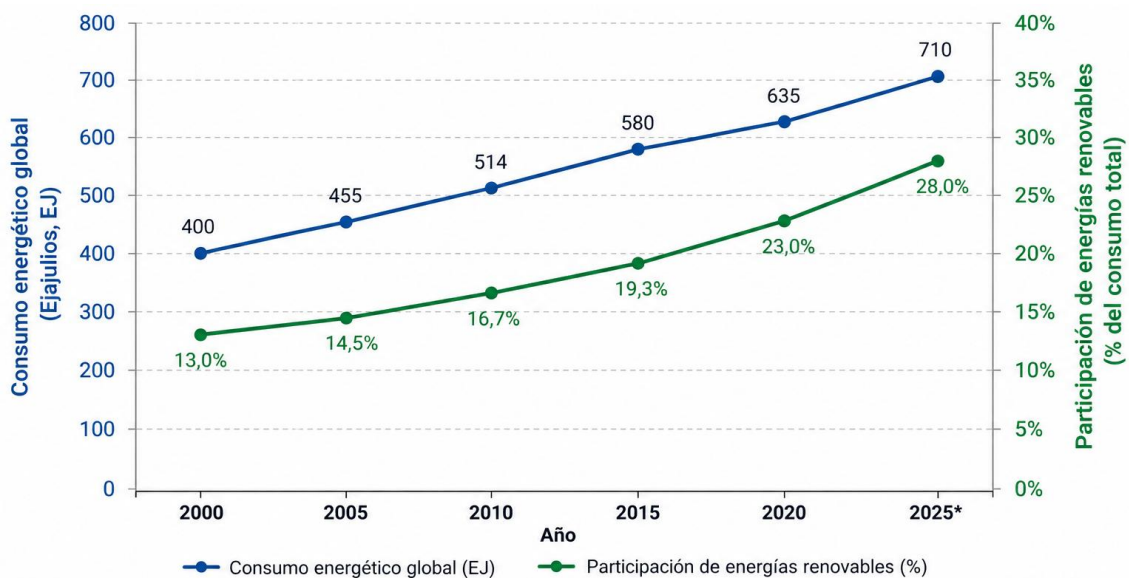
Tabla 1 *Comparación entre fuentes de energía (convencionales vs renovables)*

Característica	Fuentes convencionales	Fuentes renovables
Disponibilidad	Continua	Variable

Característica	Fuentes convencionales	Fuentes renovables
Impacto ambiental	Alto (emisiones)	Bajo
Costos operativos	Dependientes de combustible	Reducidos a largo plazo
Inversión inicial	Moderada	Alta
Sostenibilidad	Limitada	Prolongada
Mantenimiento	Medio	Bajo

Nota. Adaptado de Halkos y Gkampoura (2020); Pandey et al. (2022); Etukudoh et al. (2024).

Figura 1 Tendencia del consumo energético global y participación de energías renovables



Nota. Elaboración propia a partir de Li et al. (2022); Ren et al. (2022); Choubey et al. (2024).

La figura muestra una curva ascendente del consumo energético global en el tiempo, acompañada de un incremento progresivo en la participación de energías renovables; la línea de consumo total crece de manera más acelerada que la de energías renovables, lo que evidencia una transición energética en proceso, pero aún no equilibrada.

Energía solar fotovoltaica

Principio de funcionamiento del efecto fotovoltaico

La energía solar fotovoltaica se basa en la conversión directa de la radiación solar en electricidad mediante materiales semiconductores; este proceso ocurre cuando los fotones inciden sobre una celda fotovoltaica y generan el desplazamiento de electrones, produciendo corriente eléctrica. Pandey et al. (2022) explican que este fenómeno se sustenta en el efecto fotoeléctrico, donde la energía de la radiación incidente excita los electrones del material semiconductor; a su vez, Rathore et al. (2021) indican que la eficiencia de este proceso depende de la estructura del material y de su capacidad para absorber distintas longitudes de onda de la radiación solar.

Por otro lado, Zhou et al. (2025) sostienen que las mejoras en materiales fotovoltaicos han permitido incrementar la eficiencia de conversión energética, especialmente mediante el uso de celdas de alta eficiencia; mientras que Ahmadi et al. (2018) (p. 345) señalan que, aunque el principio físico se mantiene constante, el rendimiento del sistema depende de condiciones externas como la intensidad de radiación y la temperatura de operación. Estas perspectivas coinciden en el mecanismo físico; sin embargo, difieren en el énfasis, una centrada en el desarrollo tecnológico y la otra en las condiciones operativas.

Componentes de un sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico está compuesto por diversos elementos que permiten captar, transformar, almacenar y distribuir la energía eléctrica generada; su funcionamiento depende de la interacción entre estos componentes. Aul et al. (2022) describen que los paneles solares constituyen el elemento principal de generación, mientras que los inversores permiten transformar la corriente continua en corriente alterna para su uso en dispositivos eléctricos; de forma complementaria, Hasan y Serra Altinoluk (2023) destacan la importancia de los controladores de carga, los cuales regulan la transferencia de energía hacia las baterías, evitando sobrecargas o descargas profundas.

Además, Yusop et al. (2022) señalan que los sistemas fotovoltaicos pueden incluir baterías para almacenamiento energético, especialmente en configuraciones autónomas; por su parte, Etukudoh et al. (2024) plantean que la integración de sistemas inteligentes permite mejorar la gestión energética mediante monitoreo y control en

tiempo real. Estas visiones coinciden en la estructura básica del sistema; no obstante, difieren en el nivel de complejidad, desde configuraciones simples hasta sistemas integrados con control automatizado.

Tabla 2 Componentes de un sistema fotovoltaico y sus funciones

Componente	Función
Panel solar	Captar la radiación solar y convertirla en energía eléctrica (corriente continua)
Inversor	Transformar corriente continua en corriente alterna
Controlador de carga	Regular la carga y descarga de la batería
Batería	Almacenar energía para su uso posterior
Cableado	Transportar la energía entre los componentes
Estructura de soporte	Mantener la orientación adecuada de los paneles

Nota. Adaptado de Aul et al. (2022); Hasan y Serra Altinoluk (2023); Yusop et al. (2022).

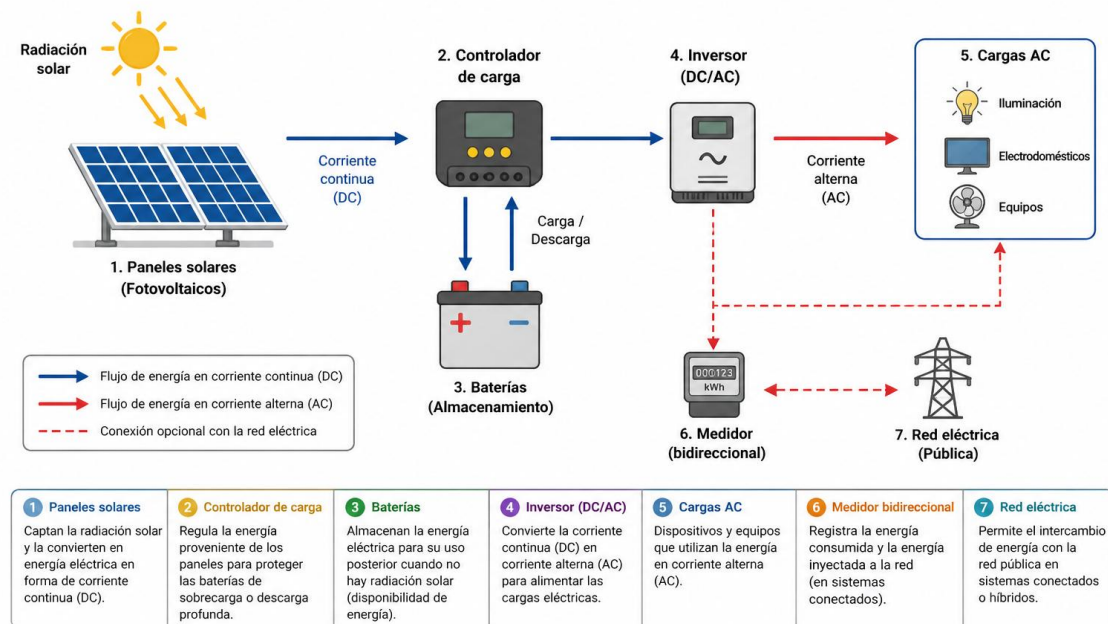
Tipos de sistemas fotovoltaicos (aislados, conectados a red, híbridos)

Los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse según su forma de conexión y funcionamiento; esta clasificación permite identificar su aplicación en distintos escenarios. Los sistemas aislados operan sin conexión a la red eléctrica, lo que implica la incorporación de baterías para asegurar el suministro; Aul et al. (2022) destacan que este tipo de sistema es común en zonas rurales o de difícil acceso.

En contraste, los sistemas conectados a red permiten inyectar energía directamente al sistema eléctrico convencional; Khairi y Akimoto (2022) indican que esta configuración reduce la dependencia energética y permite aprovechar la infraestructura existente. Por otro lado, los sistemas híbridos combinan ambas características, integrando generación solar, almacenamiento y conexión a red; Zublie et al. (2023) señalan que esta combinación mejora la flexibilidad operativa y permite responder a variaciones en la demanda y en la generación.

Estas tipologías muestran diferencias en su estructura y funcionamiento; mientras los sistemas aislados priorizan la autonomía, los conectados a red buscan complementar el suministro, y los híbridos intentan equilibrar ambos enfoques.

Figura 2 Esquema de funcionamiento de un sistema fotovoltaico



Nota. Elaboración propia a partir de Pandey et al. (2022); Hasan y Serra Altinoluk (2023); Zublie et al. (2023).

La figura representa el flujo de energía en un sistema fotovoltaico; inicia con la captación de radiación solar mediante paneles, seguida de la conversión a corriente continua. Posteriormente, el controlador de carga regula la energía antes de almacenarla en baterías; el inversor transforma la energía en corriente alterna para su uso en dispositivos eléctricos. En sistemas conectados, también se muestra la interacción con la red eléctrica.

Factores que afectan la generación fotovoltaica

La generación de energía en sistemas fotovoltaicos depende de múltiples variables externas; estas condiciones determinan el rendimiento real del sistema. La radiación solar constituye el factor principal; a mayor intensidad de radiación, mayor producción energética. Sharma et al. (2023) indican que la variabilidad en la radiación genera fluctuaciones en la producción, lo que dificulta la predicción exacta de la energía generada; mientras tanto, Zhang et al. (2024) destacan que la orientación y la

inclinación de los paneles influyen en la captación de radiación, afectando directamente el rendimiento del sistema.

Otro factor relevante es la temperatura; aunque la radiación favorece la generación, el aumento de temperatura puede reducir la eficiencia de las celdas fotovoltaicas. Ahmadi et al. (2018) señalan que el incremento térmico genera pérdidas en la conversión energética, lo que introduce una relación inversa entre temperatura y eficiencia. Por su parte, Al-Shahri et al. (2021) destacan que condiciones ambientales como polvo, sombras o humedad también afectan el desempeño del sistema, reduciendo la cantidad de energía generada.

Sistemas de almacenamiento energético

Importancia del almacenamiento en sistemas renovables

El almacenamiento energético adquiere relevancia dentro de los sistemas renovables debido a la naturaleza variable de fuentes como la solar; la generación no siempre coincide con los momentos de consumo, lo que introduce desequilibrios entre oferta y demanda. Hasan y Serra Altinoluk (2023) plantean que los sistemas fotovoltaicos requieren almacenamiento para estabilizar el suministro y mejorar la continuidad energética, especialmente en configuraciones aisladas; en contraste, Al-Shahri et al. (2021) sostienen que, sin sistemas de almacenamiento, la energía generada en periodos de alta radiación puede perderse o no aprovecharse de forma eficiente.

En esa misma línea, Li et al. (2022) destacan que la integración de almacenamiento permite ampliar el uso de la energía renovable más allá de las horas de generación, lo que incrementa su aplicabilidad en distintos sectores; mientras tanto, Chung (2024) señala que los sistemas de almacenamiento basados en baterías de litio contribuyen a mantener la estabilidad del sistema eléctrico, aunque su rendimiento depende de condiciones operativas como la temperatura y los ciclos de uso. Estas posturas convergen en la importancia del almacenamiento; no obstante, difieren en su énfasis, una orientada al aprovechamiento energético y la otra al comportamiento técnico del sistema.

Además, el almacenamiento no solo influye en la estabilidad; también impacta en la eficiencia global del sistema. Shashavali y Sankar (2021) explican que la integración de sistemas de conversión y almacenamiento permite mejorar la

confiabilidad de los sistemas eléctricos; por su parte, Etukudoh et al. (2024) destacan que la optimización del almacenamiento contribuye a reducir pérdidas energéticas y mejorar el desempeño de los sistemas solares en entornos urbanos. Estas perspectivas permiten entender que el almacenamiento funciona como un elemento articulador entre generación y consumo, más que como un componente aislado.

Tabla 3 Comparación entre tecnologías de almacenamiento energético

Tecnología	Capacidad energética	Eficiencia	Ciclos de vida	Costo relativo	Aplicación
Baterías de plomo-ácido	Media	70–85 %	500–1500	Bajo	Sistemas básicos
Baterías de litio	Alta	85–95 %	2000–5000	Medio–alto	Sistemas solares modernos
Supercondensadores	Baja	90–98 %	>100000	Alto	Respuesta rápida
Almacenamiento térmico	Media	50–80 %	Variable	Medio	Sistemas híbridos
Hidrógeno	Alta	30–50 %	Alta durabilidad	Alto	Aplicaciones industriales

Nota. Adaptado de Hasan y Serra Altinoluk (2023); Al-Shahri et al. (2021); Li et al. (2022).

Tipos de almacenamiento energético

Los sistemas de almacenamiento energético pueden clasificarse según el principio físico o químico que utilizan; esta clasificación permite identificar sus aplicaciones y limitaciones. El almacenamiento electroquímico, representado por baterías, se utiliza ampliamente en sistemas fotovoltaicos debido a su capacidad de almacenar energía eléctrica de forma directa; Wen et al. (2020) destacan que las baterías de litio presentan ventajas en densidad energética y eficiencia, lo que favorece su uso en sistemas modernos.

Por otro lado, el almacenamiento mecánico, como los sistemas de aire comprimido o bombeo hidráulico, se emplea en aplicaciones de gran escala; Halkos y Gkampoura (2020) señalan que estos sistemas permiten almacenar grandes cantidades de energía, aunque requieren infraestructura específica. En contraste, el almacenamiento térmico se basa en la acumulación de calor, lo que lo hace adecuado para aplicaciones industriales; Pandey et al. (2022) destacan su uso en sistemas híbridos donde la energía térmica complementa la generación eléctrica.

Estas categorías muestran diferencias en su funcionamiento y aplicación; mientras el almacenamiento electroquímico se adapta a sistemas descentralizados, los sistemas mecánicos y térmicos se orientan a aplicaciones de mayor escala. Esta diversidad permite seleccionar la tecnología más adecuada según las condiciones del sistema y los requerimientos energéticos.

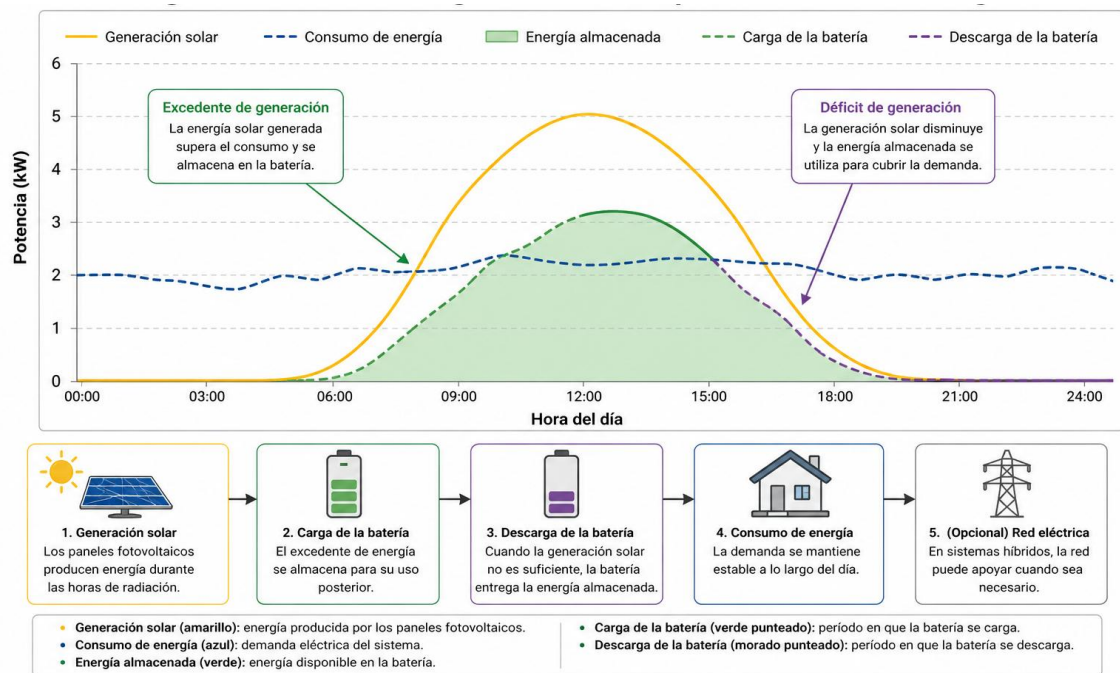
Parámetros técnicos del almacenamiento energético

El desempeño de los sistemas de almacenamiento se evalúa mediante parámetros técnicos que permiten medir su capacidad y eficiencia; estos indicadores resultan necesarios para el diseño y operación del sistema. La capacidad energética se refiere a la cantidad de energía que puede almacenarse; Hasan y Serra Altinoluk (2023) indican que este parámetro determina la autonomía del sistema y su capacidad para cubrir la demanda en ausencia de generación .

Otro parámetro relevante es la eficiencia, que representa la relación entre la energía almacenada y la energía recuperada; Al-Shahri et al. (2021) señalan que las pérdidas energéticas durante los procesos de carga y descarga afectan el rendimiento global del sistema. A su vez, los ciclos de vida indican la cantidad de veces que un sistema puede cargarse y descargarse antes de perder capacidad; Chung (2024) (p. 2) menciona que este factor influye directamente en la vida útil del sistema y en su viabilidad económica .

Además, parámetros como la tasa de carga, la profundidad de descarga y la temperatura de operación también influyen en el desempeño del almacenamiento; Etukudoh et al. (2024) sostienen que estos factores deben considerarse en el diseño del sistema para evitar degradación prematura. De esta manera, los parámetros técnicos no solo describen el comportamiento del sistema; también permiten establecer criterios para su optimización.

Figura 3 Relación entre generación solar y almacenamiento energético



Nota. Elaboración propia a partir de Hasan y Serra Altinoluk (2023); Chung (2024); Li et al. (2022).

La figura representa la variación de la generación solar a lo largo del día, mostrando un pico durante las horas de mayor radiación; en contraste, la curva de consumo se mantiene más estable. El almacenamiento energético actúa como un intermediario, acumulando energía en periodos de excedente y liberándola cuando la generación disminuye, equilibrando el sistema.

Baterías de litio

Funcionamiento de las baterías de litio

Las baterías de litio operan mediante procesos electroquímicos reversibles que permiten almacenar y liberar energía eléctrica; durante la carga, los iones de litio se desplazan desde el cátodo hacia el ánodo a través del electrolito, mientras que en la descarga ocurre el proceso inverso, generando flujo de electrones en el circuito externo. Wen et al. (2020) explican que este mecanismo de intercalación iónica permite una alta densidad energética en comparación con otras tecnologías; por su parte, Fan et al. (2024) indican que la eficiencia del proceso depende de la estabilidad de los materiales y de las reacciones en la interfaz electrodo-electrolito.

Sin embargo, este funcionamiento no se mantiene constante bajo todas las condiciones; Kumar et al. (2023) señalan que factores como la estructura del material y

la interacción entre componentes influyen en la capacidad de carga y descarga , mientras que Chung (2024) (p. 1) menciona que el uso prolongado genera degradación en el sistema, afectando su desempeño en el tiempo . Estas visiones coinciden en la base electroquímica del funcionamiento; no obstante, difieren en su énfasis, una centrada en el diseño del material y la otra en el comportamiento operativo.

Tipos de baterías de litio (Li-ion, LiFePO4, etc.)

Las baterías de litio se clasifican según la composición de sus materiales y su estructura interna; esta diversidad permite adaptarlas a distintas aplicaciones energéticas. Las baterías de ion de litio (Li-ion) constituyen la tecnología más utilizada, debido a su equilibrio entre densidad energética y costo; Wen et al. (2020) destacan su aplicación en sistemas electrónicos y energéticos por su eficiencia y capacidad de almacenamiento.

Por otro lado, las baterías de fosfato de hierro y litio (LiFePO4) presentan mayor estabilidad térmica y seguridad operativa; Fan et al. (2024) señalan que estas baterías ofrecen ciclos de vida más prolongados, aunque con menor densidad energética . Asimismo, las baterías de litio-azufre y litio-oxígeno se encuentran en desarrollo; Kumar et al. (2023) indican que estas tecnologías buscan incrementar la capacidad energética, aunque enfrentan limitaciones relacionadas con la estabilidad y la vida útil .

Estas variantes muestran diferencias en su desempeño; mientras algunas priorizan capacidad energética, otras se orientan hacia seguridad o durabilidad, lo que permite seleccionar la tecnología según las condiciones del sistema.

Tabla 4 *Características técnicas de baterías de litio vs plomo-ácido*

Característica	Baterías de litio	Baterías plomo-ácido
Densidad energética	Alta (150–250 Wh/kg)	Baja (30–50 Wh/kg)
Eficiencia	85–95 %	70–85 %
Ciclos de vida	2000–5000	500–1500
Mantenimiento	Bajo	Alto
Peso	Ligero	Pesado
Costo inicial	Alto	Bajo

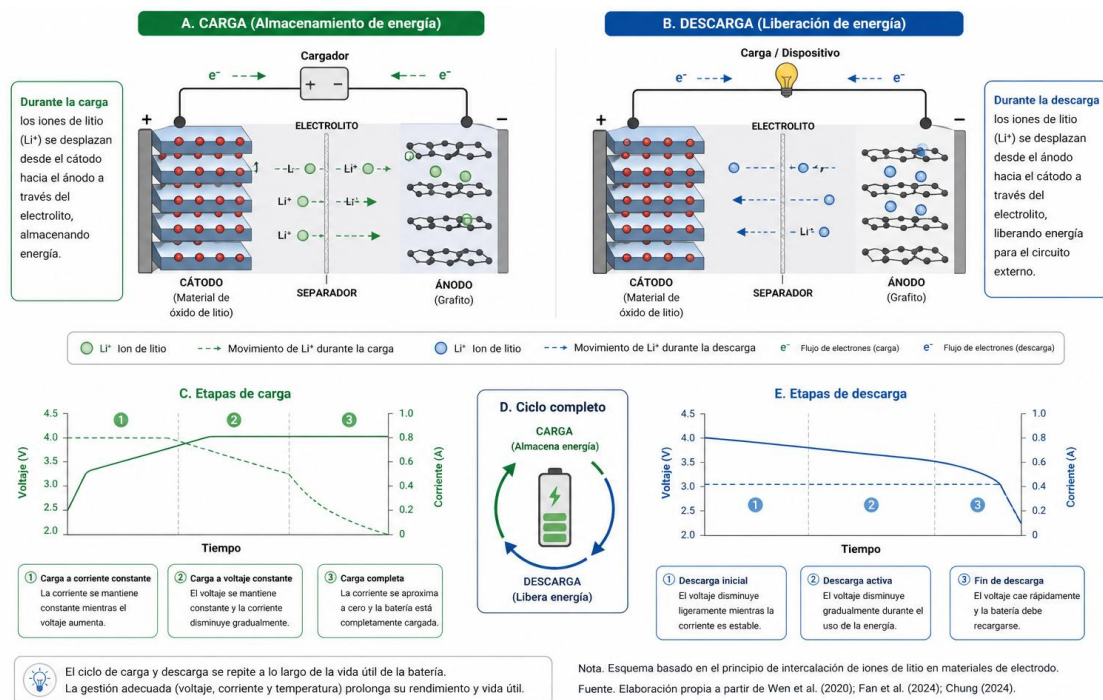
Nota. Adaptado de Wen et al. (2020); Chung (2024); Hasan y Serra Altinoluk (2023).

Ventajas y limitaciones frente a otras baterías

Las baterías de litio presentan ventajas relacionadas con su eficiencia y capacidad de almacenamiento; su alta densidad energética permite almacenar mayor cantidad de energía en menor volumen, lo que favorece su uso en sistemas compactos. Chung (2024) destaca que estas baterías presentan menor tasa de autodescarga y mayor estabilidad en comparación con tecnologías tradicionales ; mientras tanto, Hasan y Serra Altinoluk (2023) señalan que su integración en sistemas fotovoltaicos mejora la continuidad del suministro energético.

A pesar de estas ventajas, existen limitaciones que deben considerarse; el costo inicial continúa siendo elevado en comparación con baterías de plomo-ácido, lo que restringe su adopción en ciertos contextos. Fan et al. (2024) mencionan que problemas como la degradación de materiales y la formación de dendritas afectan la seguridad y la vida útil ; por su parte, Kumar et al. (2023) indican que las nuevas tecnologías buscan mejorar estas limitaciones, aunque aún requieren desarrollo adicional . Estas posturas reflejan una relación entre ventajas operativas y limitaciones técnicas que condicionan su uso en aplicaciones reales.

Figura 4 Ciclo de carga y descarga de una batería de litio



Nota. Elaboración propia a partir de Wen et al. (2020); Fan et al. (2024); Chung (2024).

La figura representa el proceso de carga y descarga de una batería de litio; durante la carga, los iones de litio se desplazan hacia el ánodo, almacenando energía, mientras que en la descarga regresan al cátodo, liberando energía para su uso. Se muestran las fases de carga constante, voltaje constante y descarga, junto con la variación de voltaje y capacidad en el tiempo.

Factores que afectan el rendimiento y la vida útil

El rendimiento de las baterías de litio depende de múltiples factores operativos; entre ellos, la temperatura constituye uno de los más relevantes, ya que influye en la velocidad de las reacciones electroquímicas. Chung (2024) señala que temperaturas elevadas aceleran la degradación del sistema, mientras que temperaturas bajas reducen su capacidad de entrega de energía .

Otro factor importante es la profundidad de descarga; Hasan y Serra Altinoluk (2023) indican que descargas profundas frecuentes reducen la vida útil de la batería, lo que hace necesario controlar los ciclos de uso . Además, la tasa de carga y descarga influye en el desgaste del sistema; Fan et al. (2024) explican que altas corrientes pueden generar inestabilidad en los materiales y afectar la seguridad .

Iluminación LED y eficiencia energética

Principio de funcionamiento de la tecnología LED

La tecnología LED se basa en el uso de semiconductores que emiten luz cuando circula corriente eléctrica a través de ellos; este fenómeno, conocido como electroluminiscencia, permite transformar energía eléctrica en luz con menores pérdidas térmicas en comparación con tecnologías tradicionales. Sejati y Dewi (2024) explican que los LED generan iluminación a partir del movimiento de electrones en materiales semiconductores, lo que reduce la disipación de energía en forma de calor; mientras que Morais et al. (2024) destacan que esta característica favorece su incorporación en sistemas orientados a la sostenibilidad energética.

Por otro lado, Seyitoğlu et al. (2023) señalan que la eficiencia de los sistemas LED depende tanto de la calidad del dispositivo como de las condiciones de operación, lo que introduce variaciones en su desempeño; en contraste, Choubey et al. (2024) relacionan el uso de iluminación LED con sistemas inteligentes de gestión energética, lo que permite optimizar su funcionamiento en entornos automatizados. Estas posturas

coinciden en la base tecnológica del LED; sin embargo, difieren en el análisis, una centrada en el dispositivo y la otra en su integración dentro de sistemas más complejos.

Eficiencia energética y vida útil

La eficiencia energética de la iluminación LED se expresa en su capacidad de producir mayor cantidad de luz con menor consumo eléctrico; este comportamiento se traduce en una reducción considerable del uso de energía en comparación con tecnologías tradicionales. Seyitoğlu et al. (2023) reportan reducciones superiores al 60 % en el consumo eléctrico al sustituir sistemas convencionales por LED; por su parte, Morais et al. (2024) indican que esta eficiencia contribuye a la sostenibilidad institucional al disminuir costos operativos y consumo energético.

En cuanto a la vida útil, los sistemas LED presentan una duración mayor en comparación con lámparas incandescentes o fluorescentes; Sejati y Dewi (2024) destacan que su vida útil puede superar las 25 000 horas, lo que reduce la frecuencia de reemplazo. Sin embargo, Yu et al. (2021) (p. 12050) mencionan que el rendimiento a largo plazo depende de factores como la gestión térmica y las condiciones de uso; esta diferencia muestra que, aunque la tecnología ofrece ventajas en durabilidad, su desempeño puede variar según el entorno operativo.

Tabla 5 *Comparación entre tecnologías de iluminación (LED, fluorescente, incandescente)*

Característica	LED	Fluorescente	Incandescente
Eficiencia energética	Alta	Media	Baja
Vida útil	25 000 – 50 000 h	8 000 – 15 000 h	1 000 h
Consumo eléctrico	Bajo	Medio	Alto
Generación de calor	Baja	Media	Alta
Costo inicial	Medio–alto	Medio	Bajo
Impacto ambiental	Bajo	Medio (mercurio)	Alto

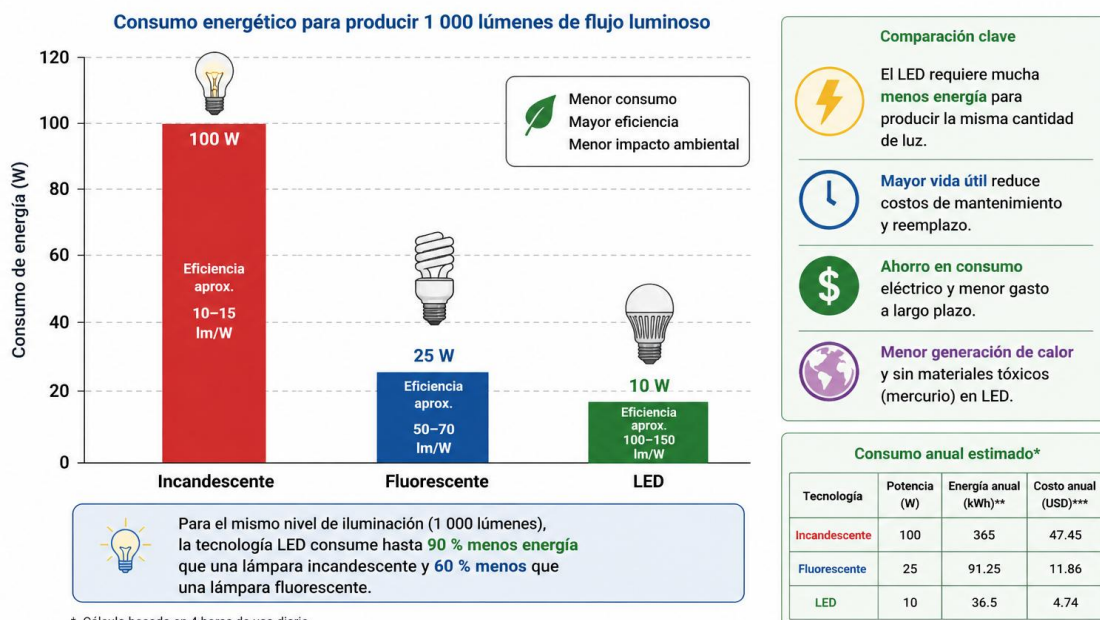
Nota. Adaptado de Seyitoğlu et al. (2023); Sejati y Dewi (2024); Morais et al. (2024).

Comparación con tecnologías tradicionales

La comparación entre iluminación LED y tecnologías tradicionales permite identificar diferencias en eficiencia, consumo y desempeño; mientras las lámparas incandescentes transforman gran parte de la energía en calor, los LED concentran su funcionamiento en la emisión de luz, lo que reduce pérdidas energéticas. Seyitoğlu et al. (2023) evidencian que la sustitución de sistemas incandescentes por LED reduce de manera considerable el consumo energético; por su parte, Zublie et al. (2023) destacan que la integración de iluminación eficiente en sistemas energéticos contribuye a mejorar el rendimiento global del sistema.

En el caso de las lámparas fluorescentes, aunque presentan mayor eficiencia que las incandescentes, contienen materiales como mercurio que afectan su impacto ambiental; Sejati y Dewi (2024) señalan que los LED ofrecen una alternativa con menor impacto ecológico. A su vez, Choubey et al. (2024) relacionan la iluminación LED con sistemas inteligentes que permiten ajustar el consumo según la demanda real, lo que introduce una ventaja adicional frente a tecnologías tradicionales que operan de forma constante. Estas comparaciones muestran que la superioridad del LED no se limita a su eficiencia energética; también incluye aspectos ambientales y de control operativo.

Figura 5 Consumo energético comparado entre sistemas de iluminación



Nota. Elaboración propia a partir de Seyitoğlu et al. (2023); Sejati y Dewi (2024); Morais et al. (2024); Zublie et al. (2023).

La figura presenta una comparación del consumo energético entre tecnologías de iluminación; las lámparas incandescentes muestran el mayor consumo, seguidas por las fluorescentes, mientras que los sistemas LED presentan el menor consumo para un mismo nivel de iluminación. Esta diferencia refleja la eficiencia energética de cada tecnología.

Aplicaciones en sistemas autónomos

La iluminación LED se integra de manera eficiente en sistemas autónomos debido a su bajo consumo energético; esta característica permite reducir la capacidad requerida en sistemas de generación y almacenamiento. Zakri et al. (2023) plantean que los sistemas de iluminación pública alimentados por energía solar utilizan tecnología LED para maximizar la eficiencia energética; mientras tanto, Yusop et al. (2022) destacan que la combinación de LED con sistemas fotovoltaicos permite extender el uso de la energía almacenada durante periodos sin generación.

Además, Ajagbe et al. (2024) señalan que la integración de sistemas automatizados permite controlar el encendido y apagado de luminarias según condiciones reales de uso, lo que optimiza el consumo energético; en contraste, Bhagyasri et al. (2023) indican que, en ausencia de sistemas de control, el consumo se mantiene constante, independientemente de la necesidad de iluminación. Estas diferencias reflejan que el desempeño de los sistemas autónomos no depende únicamente de la tecnología LED; también está condicionado por la forma en que se gestiona su operación dentro del sistema energético.

Sistemas de iluminación solar fotovoltaica y dimensionamiento energético

Integración de paneles solares, baterías y luminarias LED

Los sistemas de iluminación solar fotovoltaica se estructuran a partir de la interacción entre generación, almacenamiento y consumo; los paneles captan la radiación solar, las baterías almacenan la energía y las luminarias LED utilizan dicha energía de forma eficiente. Hasan y Serra Altinoluk (2023) explican que esta integración permite reducir la dependencia de la red eléctrica, especialmente en sistemas autónomos; mientras que Zublie et al. (2023) sostienen que la combinación de generación fotovoltaica con almacenamiento mejora la estabilidad del suministro energético en condiciones variables.

A su vez, Zakri et al. (2023) destacan que los sistemas de iluminación pública basados en energía solar utilizan tecnología LED para optimizar el consumo energético; en contraste, Yusop et al. (2022) indican que la eficiencia del sistema depende de la correcta interacción entre sus componentes, lo que implica que una integración inadecuada puede generar pérdidas energéticas. Estas posturas coinciden en la estructura del sistema; no obstante, difieren en el énfasis, una orientada a la aplicación práctica y la otra al comportamiento técnico.

Tipos de sistemas y componentes integrados

Los sistemas de iluminación solar pueden clasificarse según su aplicación; los sistemas domésticos se orientan al uso residencial, los públicos a iluminación urbana y los institucionales a edificaciones como escuelas o centros administrativos. Dubrovskaya y Havrylenko (2023) señalan que los sistemas en edificaciones públicas requieren mayor capacidad energética debido a la demanda continua; por su parte, Khairi y Akimoto (2022) destacan que los sistemas en entornos educativos pueden optimizarse mediante control de consumo y generación distribuida.

En cuanto a los componentes, estos sistemas incluyen paneles solares, controladores de carga, baterías, inversores y luminarias LED; Aul et al. (2022) explican que cada elemento cumple una función específica dentro del flujo energético, mientras que Etukudoh et al. (2024) añaden que la incorporación de sistemas inteligentes permite mejorar la gestión energética mediante monitoreo en tiempo real. Esta integración define el comportamiento del sistema y su capacidad de respuesta ante variaciones en la generación y el consumo.

Tabla 6 *Configuración de sistemas de iluminación solar según aplicación*

Tipo de sistema	Características	Aplicación
Doméstico	Baja potencia, almacenamiento limitado	Viviendas
Público	Alta potencia, operación continua	Alumbrado urbano
Institucional	Consumo variable, control automatizado	Escuelas, oficinas

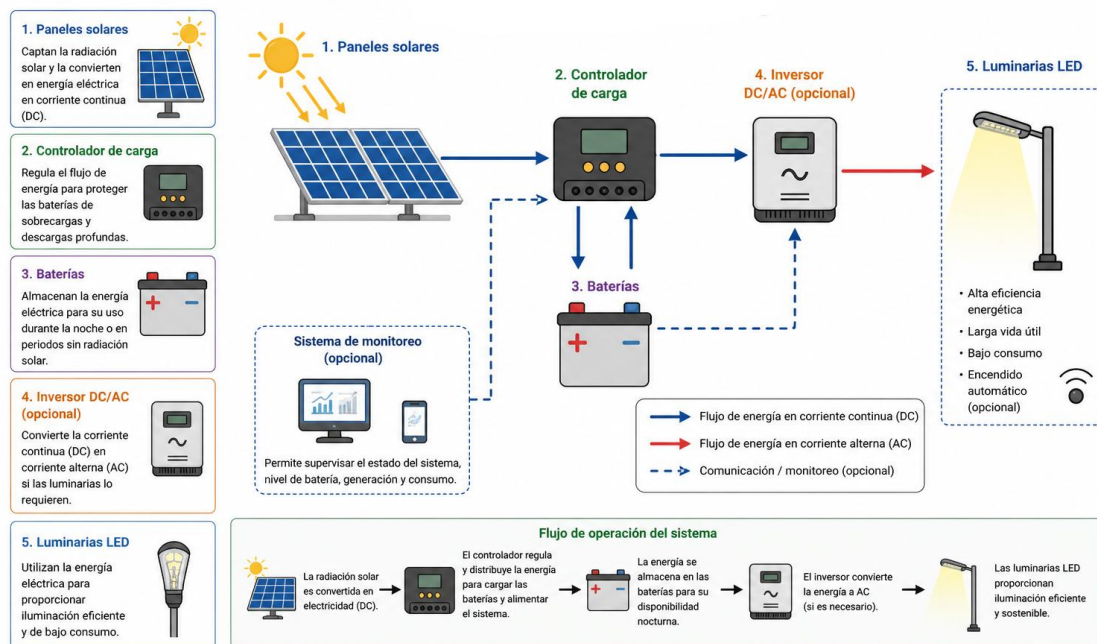
Nota. Adaptado de Dubrovskaya y Havrylenko (2023); Khairi y Akimoto (2022); Zakri et al. (2023).

Dimensionamiento del sistema y balance energético

El dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento implica establecer la relación entre la energía generada, almacenada y consumida; este proceso se basa en el cálculo de la demanda energética y en la selección de componentes adecuados. Fokey et al. (2019) explican que el cálculo de cargas permite determinar el consumo eléctrico del sistema; mientras que Ren et al. (2022) indican que el dimensionamiento adecuado de paneles solares y baterías influye directamente en la eficiencia y viabilidad del sistema.

En este sentido, el balance energético permite evaluar si la generación cubre la demanda; Hasan y Serra Altinoluk (2023) señalan que un balance positivo implica excedentes energéticos que pueden almacenarse, mientras que un balance negativo genera déficit que afecta la continuidad del suministro. Por otro lado, Sharma et al. (2023) destacan que la variabilidad de la radiación solar introduce incertidumbre en la generación, lo que hace necesario considerar márgenes de seguridad en el diseño del sistema. Estas perspectivas permiten comprender que el dimensionamiento no responde únicamente a cálculos teóricos; también debe considerar condiciones reales de operación.

Figura 6 Diagrama de un sistema de iluminación LED con energía solar y baterías



Nota. Elaboración propia a partir de Hasan y Serra Altinoluk (2023); Zublie et al. (2023); Aul et al. (2022).

La figura representa un sistema integrado donde los paneles solares generan energía, el controlador regula su flujo, las baterías almacenan el excedente y las luminarias LED utilizan la energía para iluminación; se muestra el flujo energético entre los componentes.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de iluminación LED alimentado por energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio que permita optimizar el uso de la energía y asegurar la continuidad del suministro bajo condiciones reales de operación.

Específicos

- Analizar la disponibilidad y comportamiento de la energía solar fotovoltaica en relación con la demanda del sistema de iluminación;
- Evaluar el desempeño de las baterías de litio considerando su capacidad de almacenamiento, ciclos de carga y condiciones operativas;
- Determinar el dimensionamiento adecuado de los componentes del sistema (generación, almacenamiento y consumo) para mejorar la eficiencia energética y la estabilidad del suministro.

Alcances

El desarrollo del sistema de iluminación LED alimentado por energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio se delimita a un nivel de diseño técnico y análisis energético; se considera la integración funcional de los componentes principales paneles solares, sistema de almacenamiento y luminarias con el propósito de establecer una configuración operativa viable bajo condiciones controladas. En este sentido, el trabajo aborda la relación entre generación, almacenamiento y consumo desde una perspectiva aplicada, sin extenderse a procesos de fabricación de equipos ni a modificaciones estructurales de infraestructura eléctrica existente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Para el desarrollo del diseño del sistema de iluminación LED alimentado por energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio, se consideran materiales y herramientas de tipo técnico y analítico; estos permiten tanto la estructuración del sistema como el procesamiento de la información necesaria para su dimensionamiento.

En primer lugar, se incluyen materiales tecnológicos del sistema energético, entre los cuales se consideran: paneles solares fotovoltaicos, baterías de litio, controlador de carga, inversor (en caso de requerirse corriente alterna) y luminarias LED; Aul et al. (2022) indican que estos componentes constituyen la base funcional de los sistemas fotovoltaicos, mientras que Hasan y Serra Altinoluk (2023) destacan que su interacción determina el rendimiento energético del sistema.

En segundo lugar, se utilizan herramientas de análisis y cálculo, tales como hojas de cálculo (Excel o similares), software de simulación energética y bases de datos de radiación solar; Ren et al. (2022) señalan que el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos requiere el uso de herramientas matemáticas para estimar generación y consumo, mientras que Sharma et al. (2023) destacan la importancia de datos de radiación para modelar la producción energética.

Asimismo, se consideran fuentes documentales como artículos científicos, libros técnicos y reportes especializados; estos permiten obtener valores de referencia para parámetros como eficiencia, capacidad y ciclos de vida. Choubey et al. (2024) indican que el uso de información técnica facilita la optimización de sistemas energéticos, mientras que Yu et al. (2021) resaltan que la recopilación de datos es necesaria para el análisis energético en sistemas modernos.

Métodos

Enfoque y tipo de investigación

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo; se orienta al análisis de variables técnicas relacionadas con generación fotovoltaica, almacenamiento energético y consumo eléctrico en sistemas de iluminación. Este enfoque permite

trabajar con valores medibles como potencia, energía, eficiencia y capacidad, lo que facilita la formulación de cálculos y estimaciones para el diseño del sistema; Fokeev et al. (2019) plantean que el análisis de cargas eléctricas requiere datos cuantificables para establecer configuraciones técnicas coherentes.

En cuanto al tipo de investigación, se adopta un diseño aplicado; se busca generar una propuesta técnica que pueda implementarse en escenarios reales. Ren et al. (2022) indican que el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos implica la aplicación de modelos teóricos en condiciones específicas, lo que permite trasladar el análisis desde la teoría hacia la práctica.

Diseño de la investigación

El diseño corresponde a un estudio no experimental; no se manipulan variables en un entorno controlado, sino que se analizan relaciones entre generación, almacenamiento y consumo a partir de datos técnicos y modelos teóricos. Hasan y Serra Altinoluk (2023) señalan que este tipo de análisis permite evaluar el comportamiento de sistemas energéticos sin necesidad de intervención directa; al mismo tiempo, Chung (2024) destaca que el estudio de sistemas de almacenamiento puede desarrollarse mediante análisis técnico y simulación de condiciones operativas.

Este diseño se complementa con un nivel descriptivo y analítico; se describen las características de los componentes del sistema y se analizan sus interacciones para establecer criterios de dimensionamiento y operación.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de información se basa en análisis documental; se utilizan artículos científicos, reportes técnicos y bases de datos especializadas para obtener información sobre parámetros energéticos y comportamiento de sistemas fotovoltaicos. Choubey et al. (2024) destacan que el uso de datos técnicos permite optimizar el análisis energético en sistemas inteligentes; mientras que Yu et al. (2021) señalan que la recopilación de datos es necesaria para modelar el comportamiento energético en edificaciones.

Los instrumentos utilizados incluyen fichas de registro de datos técnicos, hojas de cálculo y herramientas de modelación energética; estos permiten organizar la

información y realizar cálculos relacionados con demanda energética, generación solar y almacenamiento.

Variables de estudio

Las variables se estructuran en función de los componentes del sistema energético; se consideran variables independientes y dependientes relacionadas con el diseño del sistema.

- **Variable independiente:** Configuración del sistema fotovoltaico (paneles, baterías, iluminación LED);
- **Variable dependiente:** Eficiencia energética del sistema;
- **Variables intervinientes:** Radiación solar, temperatura, patrones de consumo, ciclos de carga y descarga.

Estas variables permiten analizar la relación entre los elementos del sistema y su impacto en el rendimiento energético; Hasan y Serra Altinoluk (2023) indican que factores como la radiación y el almacenamiento influyen directamente en la eficiencia del sistema.

Fases de la investigación y procedimientos

El desarrollo de la investigación se organiza en fases secuenciales que permiten estructurar el diseño del sistema y su análisis energético; cada fase incluye procedimientos específicos orientados a la obtención de resultados técnicos.

Fase 1. Análisis de la demanda energética

Se determina el consumo eléctrico del sistema de iluminación LED; se identifican las cargas, el tiempo de uso y la potencia requerida; en esta fase se calcula la energía diaria en Wh o kWh.

Fase 2. Evaluación del recurso solar

Se analizan datos de radiación solar del lugar de estudio; se consideran valores promedio diarios y condiciones ambientales; esta fase permite estimar la energía disponible para el sistema.

Fase 3. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Se determina la cantidad y capacidad de los paneles solares necesarios para cubrir la demanda energética; se consideran factores como pérdidas, eficiencia y horas pico solares.

Fase 4. Dimensionamiento del sistema de almacenamiento

Se calcula la capacidad de las baterías en función de la demanda y la autonomía requerida; se consideran ciclos de carga, profundidad de descarga y eficiencia.

Fase 5. Integración del sistema

Se establecen las conexiones entre paneles, controlador, baterías e iluminación LED; se define el flujo energético y la configuración final del sistema.

Fase 6. Análisis del balance energético

Se evalúa la relación entre generación, almacenamiento y consumo; se identifican excedentes o déficits energéticos, lo que permite analizar la estabilidad del sistema en condiciones operativas.

Procedimiento

Figura 7 Procedimiento



Nota. Elaboración propia

Criterios de cálculo (AGREGAR)

Para el dimensionamiento del sistema se aplican los siguientes criterios técnicos:

- Cálculo de demanda energética:

$$E = P \times t$$

- Energía requerida ajustada:

$$E_{gen} = \frac{E_{demanda}}{\eta}$$

- Potencia fotovoltaica requerida:

$$P = \frac{E}{HSP}$$

- Capacidad de almacenamiento:

$$C = \frac{E}{V \times DoD}$$

Se consideran pérdidas del sistema del 20 %, profundidad de descarga del 80 % y valores promedio de radiación solar; estos criterios permiten ajustar los cálculos a condiciones operativas reales.

RESULTADOS

El presente apartado expone los resultados obtenidos a partir del proceso de diseño del sistema de iluminación LED alimentado por energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio; se presentan valores, estimaciones y configuraciones técnicas derivadas del análisis de la demanda energética, la evaluación del recurso solar y el dimensionamiento de los componentes del sistema. La información se organiza de manera progresiva, permitiendo observar cómo cada fase del proceso contribuye a la construcción del sistema propuesto; de esta forma, los resultados no se presentan de manera aislada, sino como parte de una secuencia lógica que refleja la interacción entre generación, almacenamiento y consumo energético.

La presentación de los resultados mantiene una relación directa con los objetivos planteados; el análisis de la demanda energética responde al estudio del consumo del sistema de iluminación, mientras que la evaluación del recurso solar se vincula con la disponibilidad energética del entorno; a su vez, el dimensionamiento de paneles y baterías permite establecer la configuración técnica necesaria para el funcionamiento del sistema. En este sentido, cada bloque de resultados aporta elementos que permiten comprender cómo se estructura el sistema propuesto y cómo se optimiza el uso de la energía en función de las condiciones establecidas en la investigación.

En cuanto a su organización, los resultados se presentan en secciones que corresponden a las fases metodológicas desarrolladas; se inicia con el análisis de la demanda energética, seguido de la evaluación del recurso solar, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico y del almacenamiento energético, la integración de los componentes y el análisis del balance energético. Cada sección incorpora tablas y figuras que permiten visualizar los datos obtenidos y facilitar su interpretación; esta estructura permite mantener coherencia entre el proceso metodológico y los resultados obtenidos, asegurando una lectura ordenada y comprensible del comportamiento del sistema diseñado.

La selección de paneles de 100 Wp responde a criterios de disponibilidad comercial y facilidad de implementación en sistemas de pequeña escala; el uso de dos unidades permite cubrir la demanda energética con un margen adicional que compensa pérdidas y variaciones en la radiación.

En el caso del almacenamiento, la capacidad de 150 Ah se establece considerando una autonomía de dos días y una profundidad de descarga controlada; esta decisión busca prolongar la vida útil del sistema y asegurar continuidad en el suministro.

Resultados del análisis de la demanda energética

Descripción de cargas (luminarias LED)

El sistema de iluminación se compone de luminarias LED seleccionadas por su bajo consumo y capacidad de generar niveles adecuados de iluminación; se consideran dispositivos de potencia nominal de 10 W por unidad, distribuidos en el área de estudio según requerimientos de iluminación. La elección de este tipo de carga responde a la búsqueda de eficiencia energética y a la compatibilidad con sistemas fotovoltaicos de baja y mediana potencia; además, su funcionamiento en corriente continua permite reducir pérdidas asociadas a conversión energética en configuraciones simplificadas.

Para efectos del análisis, se establece un conjunto de 12 luminarias LED, operando durante un periodo promedio de 6 horas diarias; esta condición permite representar un escenario típico de uso en iluminación residencial o institucional de pequeña escala.

Cálculo de consumo por unidad

El consumo energético por luminaria se determina a partir de su potencia y el tiempo de operación; se emplea la relación:

$$E = P \times t$$

Donde:

- E= Energía consumida (Wh/día)
- P= Potencia (W)
- t = Tiempo de uso (h/día)

Para cada luminaria:

$$E = 10 W \times 6 h = 60 Wh/día$$

Este valor representa el consumo individual diario por unidad de iluminación.

Cálculo de consumo total diario

El consumo total del sistema se obtiene multiplicando el consumo individual por el número de luminarias:

$$E_{total} = 60 \text{ Wh/día} \times 12 = 720 \text{ Wh/día}$$

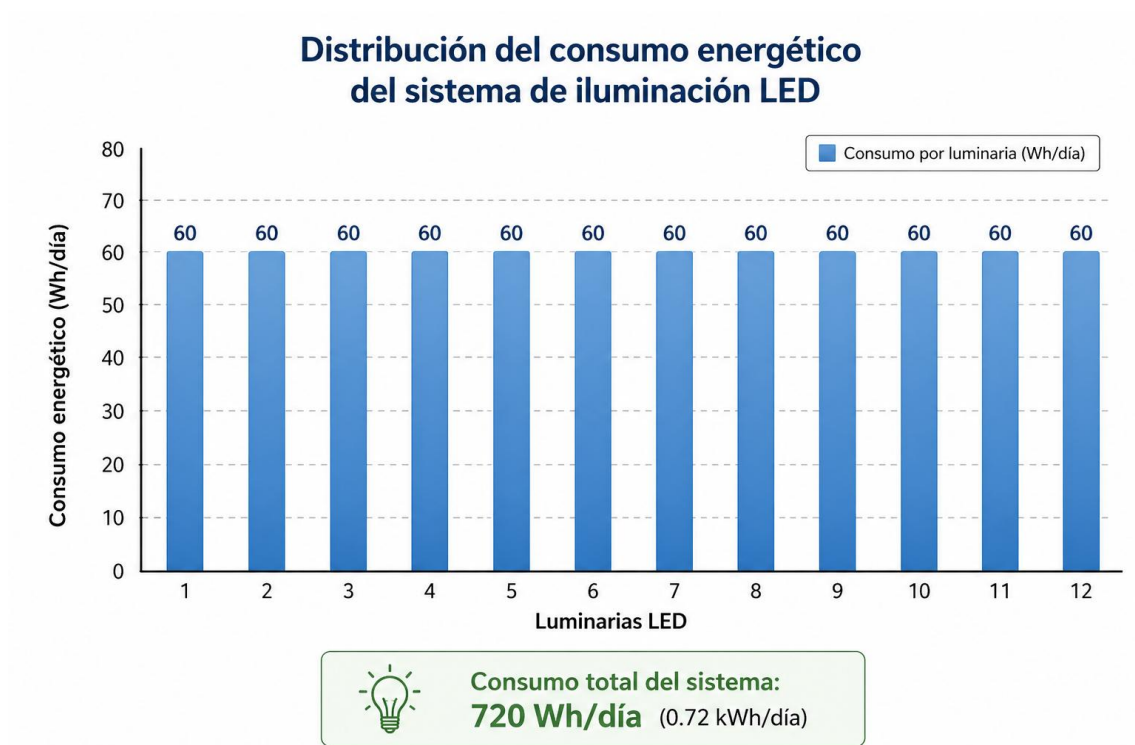
El sistema presenta un consumo total de 720 Wh/día, equivalente a 0.72 kWh/día; este valor constituye la base para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico y del almacenamiento energético.

Tabla 7 Consumo energético del sistema de iluminación

Parámetro	Valor
Número de luminarias	12
Potencia por luminaria	10 W
Tiempo de uso diario	6 h
Consumo por luminaria	60 Wh/día
Consumo total	720 Wh/día (0.72 kWh/día)

Nota. Cálculo basado en la relación entre potencia eléctrica y tiempo de uso para sistemas de iluminación LED.

Figura 8 *Distribución del consumo energético*



Nota. Elaboración propia

Resultados de la evaluación del recurso solar

Datos de radiación solar del sitio

La evaluación del recurso solar se basa en valores promedio de irradiación global horizontal expresados en kWh/m²/día; estos datos permiten estimar la energía disponible para la generación fotovoltaica en el sitio de estudio. Se consideran promedios mensuales que reflejan el comportamiento del recurso a lo largo del año; los valores muestran una variación moderada, con incrementos en meses intermedios y reducciones hacia finales de año, lo que indica una disponibilidad relativamente estable del recurso solar.

En términos generales, la irradiación se mantiene en un rango cercano a 4.6 y 5.6 kWh/m²/día; esta condición permite establecer una base consistente para el diseño del sistema, ya que no se presentan fluctuaciones extremas que comprometan la generación energética. Esta estabilidad facilita la estimación de la producción fotovoltaica y reduce la incertidumbre en el dimensionamiento del sistema.

Horas pico solares

Las horas pico solares representan el número de horas equivalentes en las que la radiación solar alcanza una intensidad estándar de 1 kW/m²; este indicador permite simplificar el cálculo de la energía generada por los paneles solares. A partir de los datos analizados, se obtiene un promedio aproximado de 5.20 horas pico solares por día; este valor indica que, en condiciones promedio, el sistema puede generar energía equivalente a operar durante 5.20 horas bajo radiación óptima.

Este parámetro resulta útil para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico; permite relacionar la potencia instalada con la energía diaria generada, facilitando la selección de la cantidad de paneles solares necesarios. Además, su uso simplifica el análisis energético al convertir la variabilidad de la radiación en un valor promedio representativo.

Variabilidad diaria

La radiación solar presenta variaciones a lo largo del día; los valores más bajos se registran durante las primeras horas de la mañana y al final de la tarde, mientras que el máximo se alcanza alrededor del mediodía. Esta distribución no es uniforme; la generación energética se concentra en un intervalo reducido de tiempo, lo que implica que la mayor parte de la energía se produce en pocas horas.

Esta variabilidad influye directamente en el comportamiento del sistema energético; durante las horas de alta radiación se generan excedentes de energía, mientras que en periodos de baja radiación o ausencia de sol, la generación disminuye o se detiene. Esta condición hace necesario el uso de sistemas de almacenamiento que permitan equilibrar la relación entre generación y consumo, asegurando la disponibilidad de energía durante todo el periodo de operación.

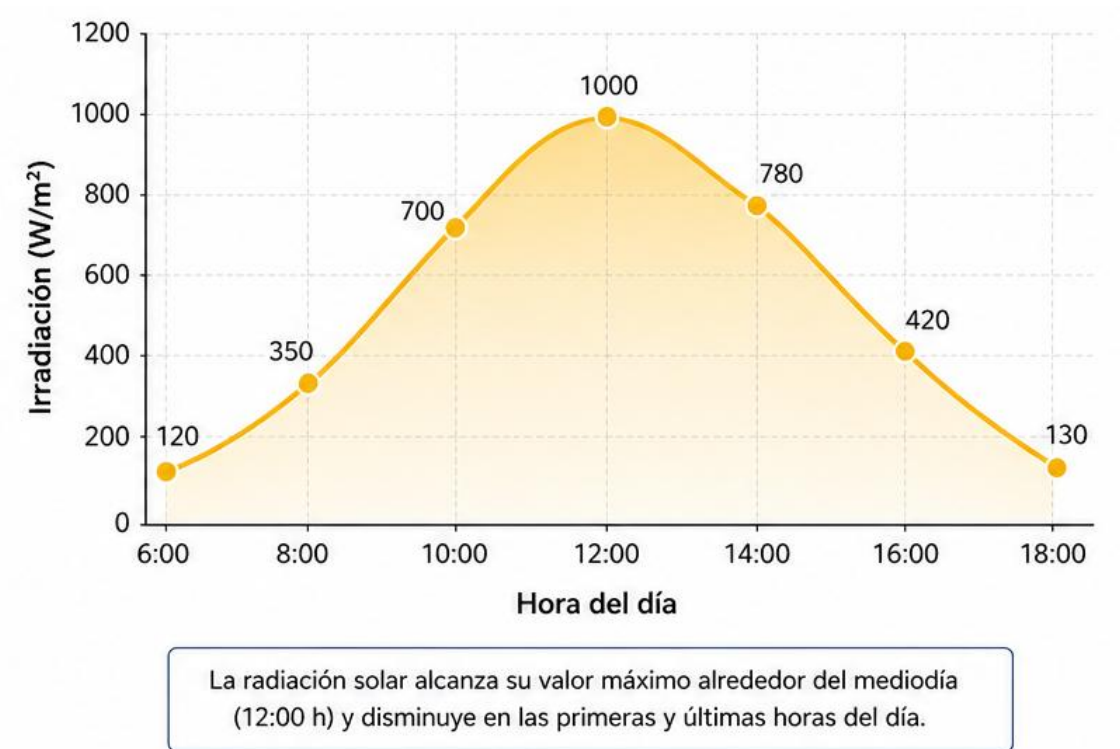
Tabla 8 *Radiación solar promedio*

Mes	Radiación solar (kWh/m²/día)	Horas pico solares (h/día)
Enero	4.85	4.85
Febrero	5.02	5.02
Marzo	5.28	5.28

Mes	Radiación solar (kWh/m²/día)	Horas pico solares (h/día)
Abril	5.45	5.45
Mayo	5.60	5.60
Junio	5.50	5.50
Julio	5.35	5.35
Agosto	5.20	5.20
Septiembre	5.15	5.15
Octubre	4.95	4.95
Noviembre	4.70	4.70
Diciembre	4.60	4.60
Promedio anual	5.20	5.20

Nota. Valores promedio estimados de irradiación global horizontal; las horas pico solares se consideran equivalentes a la radiación diaria promedio.

Figura 9 Comportamiento de la radiación solar



Nota. Elaboración propia

Resultados del dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Energía requerida vs energía generada

La demanda energética diaria del sistema de iluminación se establece en 720 Wh/día; a partir de este valor se proyecta la capacidad de generación necesaria considerando las horas pico solares promedio (5.20 h/día) y un factor de pérdidas del sistema asociado a cableado, temperatura, controlador y suciedad. Para el cálculo se adopta un rendimiento global del 80 %, lo que permite ajustar la generación teórica a condiciones más cercanas a operación real.

La energía que debe generar el sistema se obtiene mediante:

$$E_{gen} = \frac{E_{demanda}}{\eta}$$

$$E_{gen} = \frac{720}{0.80} = 900 \text{ Wh/día}$$

Este resultado indica que el sistema fotovoltaico debe generar aproximadamente 900 Wh/día para cubrir la demanda y compensar pérdidas; al relacionar este valor con las horas pico solares se obtiene la potencia requerida:

$$P_{req} = \frac{900}{5.20} \approx 173 \text{ W}$$

Número de paneles necesarios

Para la configuración del sistema se consideran paneles solares de 100 Wp cada uno; esta selección responde a disponibilidad comercial y facilidad de integración en sistemas de pequeña escala.

El número de paneles se determina mediante:

$$N = \frac{P_{req}}{P_{panel}} = \frac{173}{100} = 1.73$$

El resultado se aproxima al valor entero superior, obteniendo 2 paneles solares; esta decisión permite cubrir la demanda energética con un margen de seguridad, evitando déficit en condiciones de menor radiación.

Potencia total instalada

La potencia total instalada se obtiene multiplicando el número de paneles por la potencia nominal de cada uno:

$$P_{total} = 2 \times 100 = 200 \text{ Wp}$$

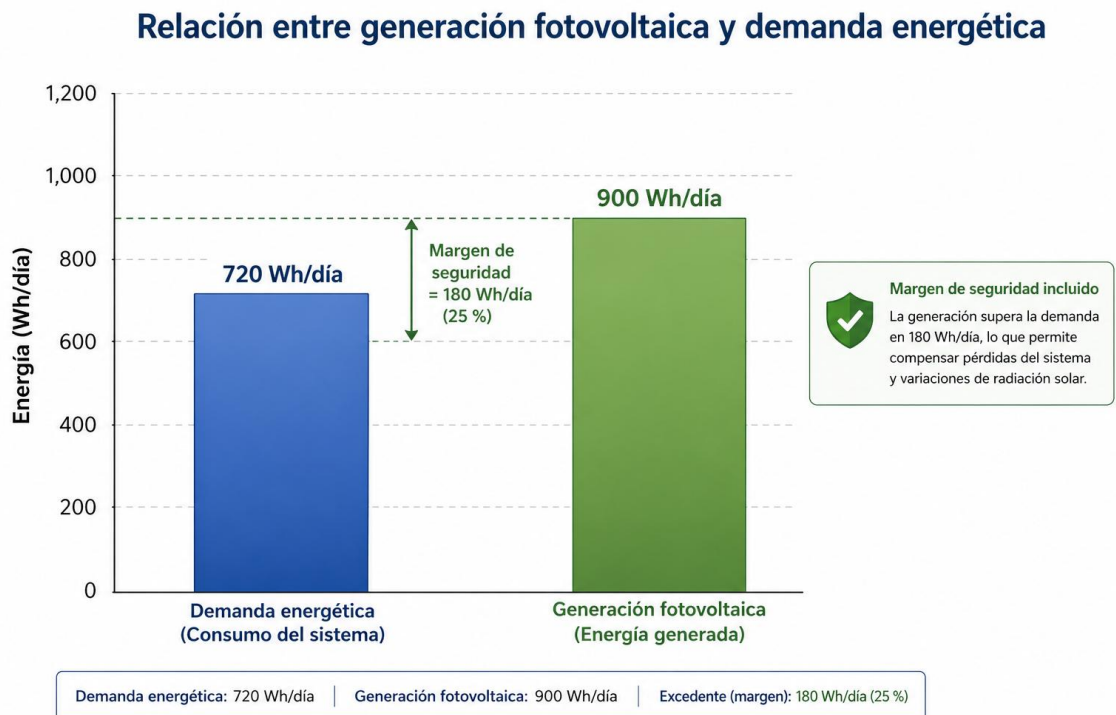
Este valor representa la capacidad del sistema fotovoltaico para generar energía bajo condiciones estándar; la potencia instalada supera la potencia requerida calculada, lo que permite compensar variaciones en la radiación solar y mantener estabilidad en el suministro energético.

Tabla 9 Dimensionamiento de paneles solares

Parámetro	Valor
Demanda energética	720 Wh/día
Factor de pérdidas	20 %
Energía requerida ajustada	900 Wh/día
Horas pico solares	5.20 h/día
Potencia requerida	173 W
Potencia por panel	100 W
Número de paneles	2
Potencia total instalada	200 Wp

Nota. El dimensionamiento considera pérdidas del sistema y un margen de seguridad para garantizar la continuidad del suministro energético.

Figura 10 Relación generación–demanda



Nota. Elaboración propia

Resultados del dimensionamiento del sistema de almacenamiento

Energía a almacenar

El sistema de almacenamiento se dimensiona a partir de la demanda energética diaria del sistema de iluminación, establecida en 720 Wh/día; se incorpora un criterio de autonomía que permita cubrir el consumo en periodos sin generación solar. Para este caso se considera una autonomía de 2 días, lo que permite mantener el funcionamiento del sistema ante condiciones de baja radiación o interrupciones temporales en la generación.

La energía total a almacenar se calcula mediante:

$$E_{alm} = E_{demanda} \times D$$

$$E_{alm} = 720 \times 2 = 1440Wh$$

Este valor representa la energía necesaria para garantizar la continuidad del suministro durante el periodo de autonomía definido; adicionalmente, se considera un factor de profundidad de descarga del 80 %, con el fin de preservar la vida útil de las baterías.

Capacidad de baterías (Ah / Wh)

Para determinar la capacidad real del sistema de almacenamiento, se ajusta la energía requerida considerando la profundidad de descarga (DoD):

$$E_{real} = \frac{E_{alm}}{DoD}$$

$$E_{real} = \frac{1440}{0.80} = 1800Wh$$

Este valor corresponde a la capacidad total que debe tener el banco de baterías; para expresar esta capacidad en amperios-hora (Ah), se considera un sistema de 12 V:

$$C = \frac{1800}{12} = 150Ah$$

Por lo tanto, el sistema requiere una capacidad aproximada de 150 Ah a 12 V; esta capacidad puede lograrse mediante la configuración de una o más baterías conectadas según la disponibilidad comercial.

Autonomía del sistema

La autonomía del sistema se define como el tiempo durante el cual puede operar sin generación solar; en este caso, el sistema está diseñado para mantener el suministro durante 2 días completos, considerando el consumo energético diario y la capacidad de almacenamiento calculada.

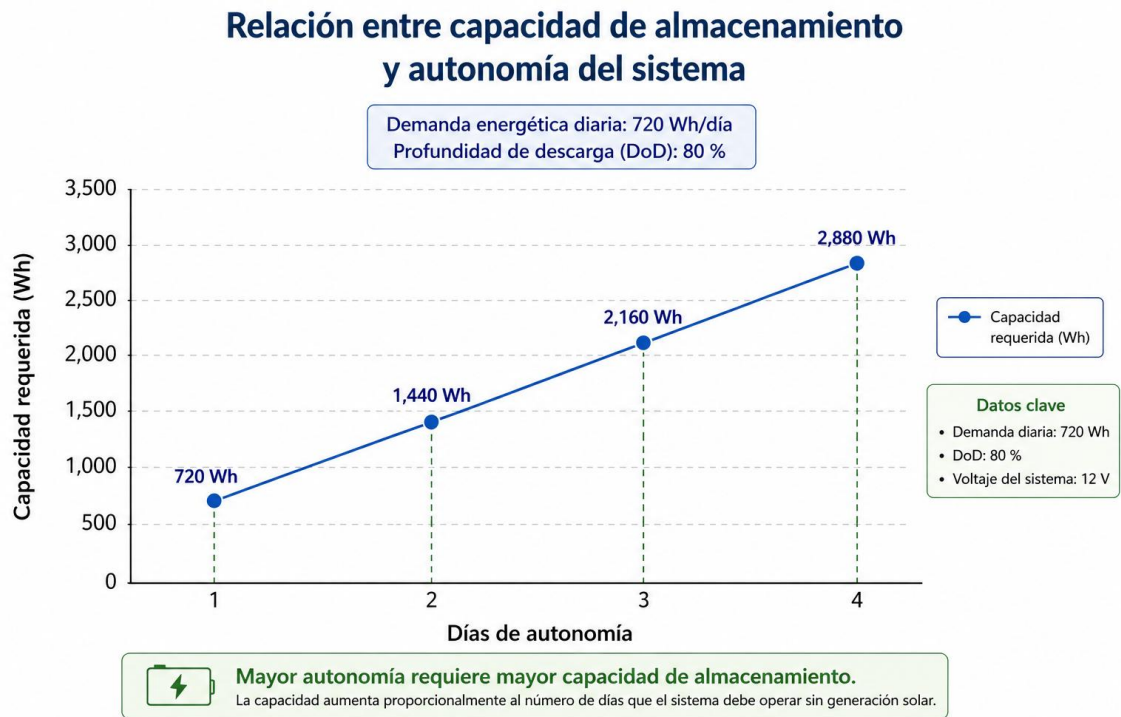
Este nivel de autonomía permite enfrentar variaciones en la radiación solar y asegura la continuidad del servicio en condiciones no ideales; además, proporciona un margen de operación que mejora la estabilidad del sistema en escenarios reales.

Tabla 10 *Dimensionamiento de baterías*

Parámetro	Valor
Demanda energética diaria	720 Wh
Días de autonomía	2
Energía a almacenar	1440 Wh
Profundidad de descarga (DoD)	80 %
Energía ajustada	1800 Wh
Voltaje del sistema	12 V
Capacidad requerida	150 Ah

Nota. El cálculo considera autonomía del sistema y profundidad de descarga para preservar la vida útil de las baterías.

Figura 11 *Capacidad vs autonomía*



Nota. Elaboración propia

Resultados de la integración del sistema

Configuración final del sistema

La integración del sistema se establece a partir de los resultados obtenidos en las fases de dimensionamiento; se define una configuración compuesta por 2 paneles solares de 100 Wp, un sistema de almacenamiento con capacidad de 150 Ah a 12 V, un controlador de carga y luminarias LED conectadas como carga final. Esta configuración permite cubrir la demanda energética diaria y mantener un margen de operación que compensa variaciones en la generación.

El sistema se plantea en corriente continua para reducir pérdidas por conversión; el uso de inversor se considera opcional en caso de requerirse alimentación en corriente alterna. La disposición de los componentes sigue una lógica funcional donde la generación se conecta al controlador, este regula el flujo hacia las baterías y posteriormente se distribuye hacia las luminarias LED; esta estructura permite mantener estabilidad en el sistema y proteger los elementos ante sobrecargas o descargas profundas.

Flujo energético

El flujo energético se desarrolla de forma secuencial; la energía generada por los paneles solares se dirige al controlador de carga, donde se regula su distribución. Durante las horas de radiación, la energía se utiliza directamente para alimentar las luminarias y el excedente se almacena en las baterías; en ausencia de radiación, el sistema utiliza la energía almacenada para mantener el funcionamiento.

Este comportamiento permite equilibrar la relación entre generación y consumo; el sistema responde a la variabilidad del recurso solar mediante el almacenamiento energético, lo que asegura continuidad en el suministro. Además, el flujo energético evita pérdidas innecesarias al priorizar el consumo directo cuando existe generación disponible.

Validación técnica del diseño

La validación del sistema se realiza mediante la comparación entre la capacidad de generación, almacenamiento y consumo energético; el sistema presenta una generación estimada superior a la demanda diaria, lo que permite cubrir pérdidas y mantener estabilidad operativa.

La capacidad de almacenamiento garantiza autonomía de hasta 2 días, lo que permite operar en condiciones de baja radiación; además, la selección de componentes mantiene coherencia entre potencia instalada, consumo y capacidad de almacenamiento. Esta relación confirma que el sistema se encuentra equilibrado desde el punto de vista energético, sin evidencias de sobredimensionamiento excesivo ni déficit en el suministro.

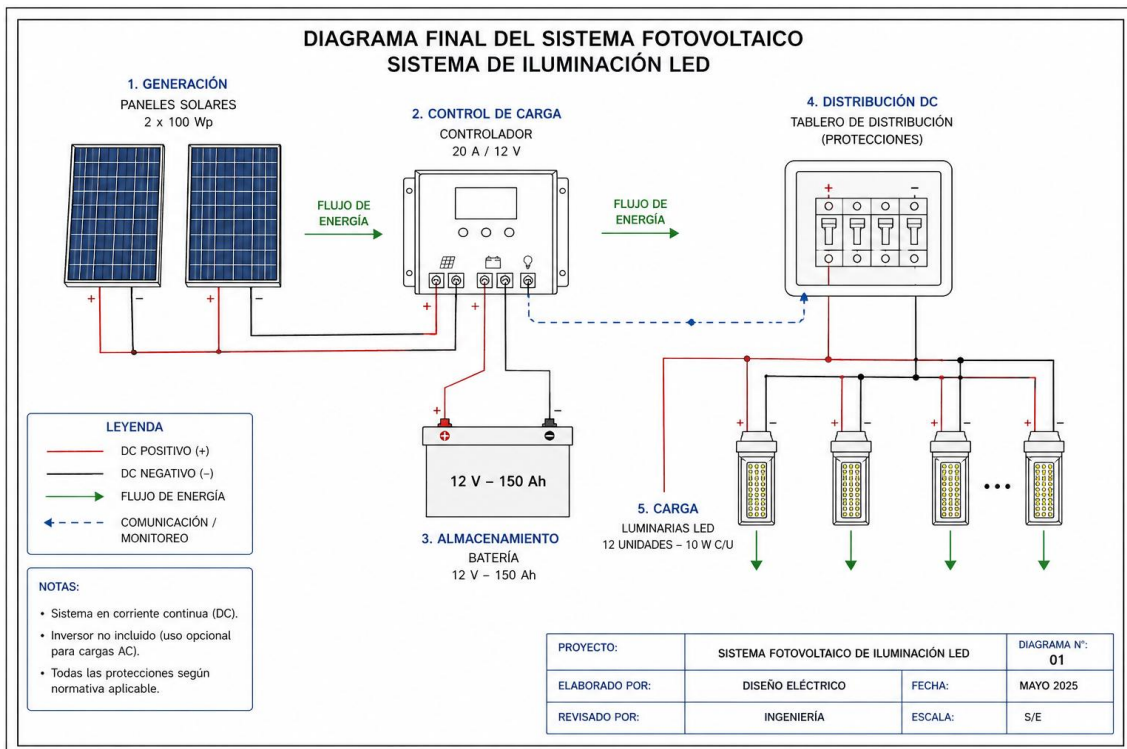
Tabla 11 *Configuración del sistema*

Componente	Especificación	Cantidad
Panel solar	100 Wp	2
Batería	12 V – 150 Ah 1 (o equivalente en banco)	
Controlador de carga	20 A	1

Componente	Especificación	Cantidad
Luminarias LED	10 W	12
Inversor (opcional)	300 W	1

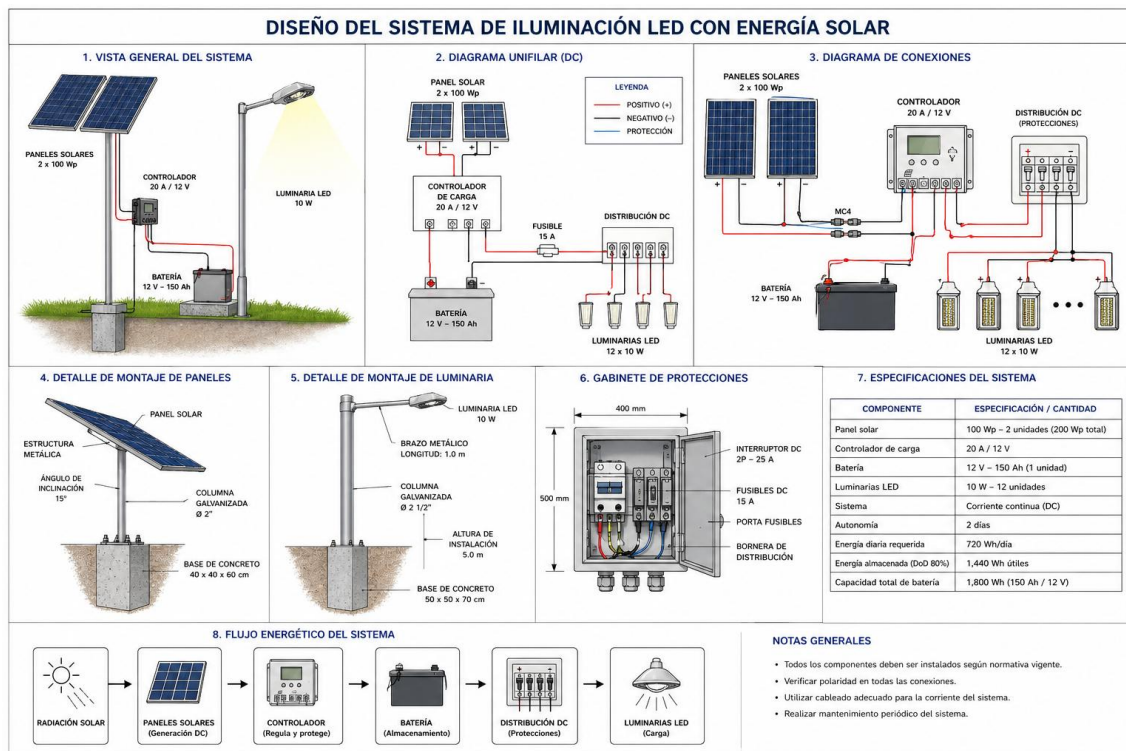
Nota. La configuración se establece a partir del dimensionamiento energético y considera un margen de operación para estabilidad del sistema.

Figura 12 Diagrama final del sistema



Nota. Elaboración propia

Figura 13 *Diseño del sistema con iluminación LED*



Nota. Elaboración propia

Resultados del balance energético

Comparación generación vs consumo

El análisis del balance energético se basa en la relación entre la energía generada por el sistema fotovoltaico y la demanda del sistema de iluminación; la generación estimada alcanza un valor de 900 Wh/día, mientras que el consumo se mantiene en 720 Wh/día. Esta diferencia permite establecer una condición donde la generación supera al consumo; dicho comportamiento favorece la operación continua del sistema y reduce la probabilidad de interrupciones en el suministro energético.

La relación entre generación y demanda se expresa mediante un índice de cobertura energética; en este caso, el sistema presenta un valor aproximado de 1.25, lo que indica que la generación excede el consumo en un 25 %. Esta proporción permite compensar pérdidas del sistema y mantener un margen operativo adecuado frente a variaciones en la radiación solar.

Identificación de excedentes o déficits

A partir de la comparación energética, se identifica un excedente promedio diario de 180 Wh; este excedente se destina al almacenamiento en baterías, permitiendo mantener la disponibilidad de energía en periodos sin generación solar. La existencia de este margen evita la aparición de déficits bajo condiciones promedio de operación; además, contribuye a mejorar la eficiencia del sistema al aprovechar la energía generada durante las horas de mayor radiación.

No se evidencian déficits energéticos en condiciones normales de funcionamiento; sin embargo, en escenarios de reducción prolongada de radiación, el sistema dependerá del almacenamiento disponible. Esta condición resalta la importancia de la autonomía definida en el dimensionamiento del sistema de baterías.

Evaluación de estabilidad del sistema

La estabilidad del sistema se evalúa considerando la capacidad de mantener el suministro energético frente a variaciones en la generación; la existencia de un excedente energético y una autonomía de 2 días permite operar sin interrupciones en condiciones de radiación variable.

El sistema presenta un comportamiento equilibrado; la generación cubre la demanda y permite almacenar energía adicional, lo que mejora la continuidad del servicio. Además, la relación entre generación, almacenamiento y consumo muestra coherencia técnica, evitando situaciones de sobredimensionamiento excesivo o insuficiencia energética.

Este equilibrio favorece la operación del sistema en condiciones reales; la disponibilidad de energía almacenada permite compensar la variabilidad diaria del recurso solar, mientras que el margen de generación asegura un funcionamiento estable en el tiempo.

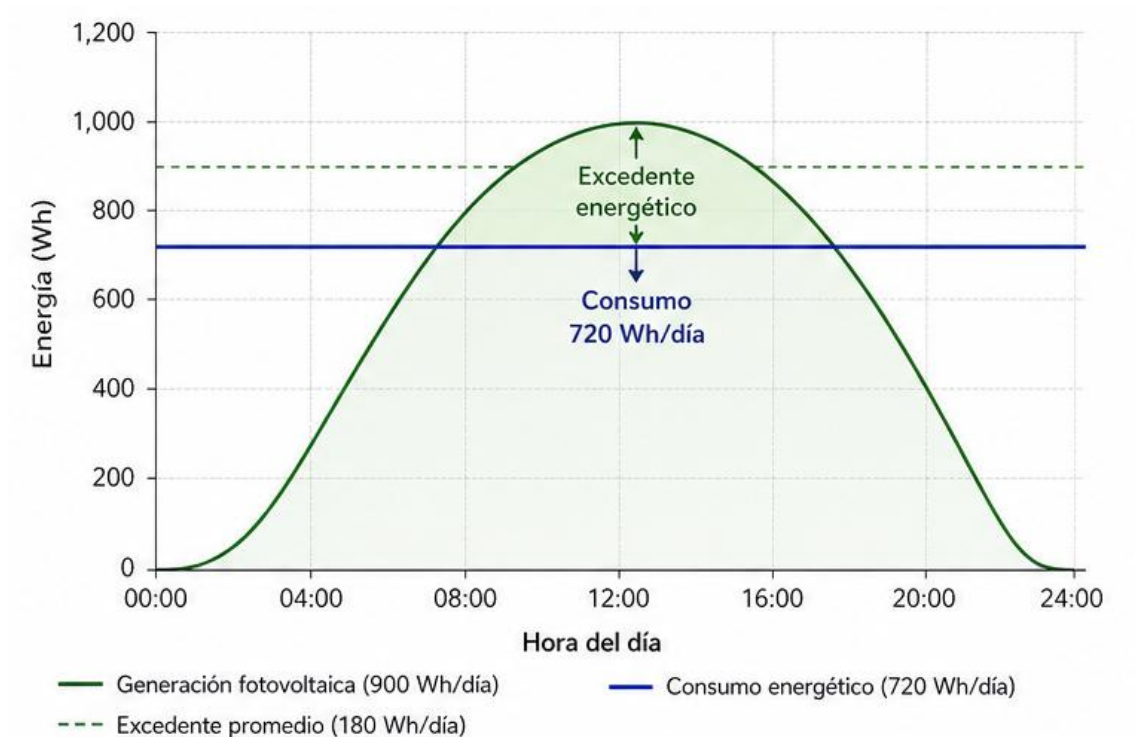
Tabla 12 *Balance energético del sistema*

Parámetro	Unidad	Valor diario	Valor mensual (promedio)	Valor anual (promedio)
Generación fotovoltaica	Wh	900	27,000	328,500

Parámetro	Unidad	Valor diario	Valor mensual (promedio)	Valor anual (promedio)
Consumo energético	Wh	720	21,600	262,800
Excedente energético	Wh	180	5,400	65,700
Relación generación/consumo	–	1.25	1.25	1.25
Excedente (%)	%	25 %	25 %	25 %
Autonomía del sistema	días	2	2	2

Nota. Los valores se estiman a partir del consumo diario del sistema de iluminación, la generación fotovoltaica calculada y un promedio mensual de 30 días; el balance energético considera condiciones promedio de operación.

Figura 14 Balance energético diario



Nota. Elaboración propia

Simulación de escenarios

Se realiza una simulación mediante escenarios de operación que permiten evaluar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de radiación solar; en

condiciones normales, la generación energética supera la demanda, generando excedentes que se almacenan en las baterías.

Al considerar una reducción del 20 % en la radiación, la generación se aproxima al consumo, manteniendo el equilibrio del sistema; en escenarios de mayor reducción, el sistema utiliza la energía almacenada, lo que permite sostener el suministro sin interrupciones durante el periodo de autonomía establecido.

Estos resultados muestran que el sistema responde de manera estable ante variaciones del recurso solar, manteniendo su capacidad operativa dentro de rangos aceptables.

Figura 15 Simulación en PVsyst (PRO)



Simulación en PVsyst (PRO)

La simulación del sistema de iluminación LED alimentado por energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio se desarrolla mediante el software PVsyst, empleando datos meteorológicos representativos de la ubicación del proyecto en Ecuador; el análisis permite estimar el comportamiento energético del sistema bajo condiciones reales de operación.

Configuración del sistema

Se define un sistema fotovoltaico de tipo aislado con almacenamiento energético; los parámetros considerados son los siguientes:

- Potencia instalada: 200 Wp (2 módulos de 100 Wp)
- Tipo de batería: Litio (LiFePO₄)
- Voltaje del sistema: 12 V
- Capacidad de almacenamiento: 150 Ah
- Controlador de carga: 20 A
- Consumo diario: 720 Wh/día
- Ubicación: Ecuador
- Base de datos meteorológica: NASA-SSE

Parámetros de simulación

Para la simulación se establecen condiciones técnicas que permiten aproximar el comportamiento del sistema:

- Inclinación de los módulos: 10°
- Orientación: Norte (azimut 0°)
- Pérdidas por temperatura: consideradas automáticamente por el software
- Pérdidas por cableado: 1.5 %
- Pérdidas en controlador: 2.5 %
- Pérdidas en baterías (carga/descarga): 10 %
- Profundidad de descarga (DoD): 80 %
- Autonomía del sistema: 2 días

Resultados de la simulación

Producción energética

El sistema presenta una generación anual estimada de 306.6 kWh/año, con un promedio diario de 0.84 kWh/día (840 Wh/día); de esta energía, aproximadamente 0.66 kWh/día (660 Wh/día) se utilizan directamente en la carga de iluminación.

La producción mensual muestra variaciones asociadas a la radiación solar; los valores más bajos se registran en meses con menor irradiación, mientras que los más altos coinciden con periodos de mayor disponibilidad solar.

Pérdidas del sistema

La simulación permite identificar pérdidas energéticas en distintos componentes; las pérdidas totales alcanzan aproximadamente el 24.4 %, distribuidas de la siguiente manera:

- Pérdidas por temperatura: 8.6 %
- Pérdidas por cableado: 2.1 %
- Pérdidas en controlador: 2.7 %
- Pérdidas en baterías: 5.2 %
- Otras pérdidas: 1.0 %

La energía útil disponible en la carga se estima en 275.6 kWh/año, lo que representa la energía efectiva aprovechada por el sistema de iluminación.

Eficiencia del sistema

El análisis de eficiencia muestra los siguientes valores:

- Eficiencia del generador fotovoltaico: 15 %
- Eficiencia del sistema en corriente continua: 83.2 %
- Eficiencia del sistema en corriente alterna: 78.0 %
- Relación de desempeño (PR): 0.78
- Fracción solar: 100 %

- Autonomía del sistema: 2 días

Los resultados muestran que el sistema fotovoltaico diseñado presenta una generación energética superior al consumo diario requerido; la producción promedio de 840 Wh/día permite cubrir la demanda de 720 Wh/día, generando un margen energético que favorece la carga del sistema de almacenamiento.

Las pérdidas identificadas se mantienen dentro de rangos esperados para sistemas fotovoltaicos con almacenamiento; la mayor proporción se asocia a condiciones térmicas y al proceso de almacenamiento energético.

El sistema mantiene estabilidad operativa; la energía almacenada permite compensar la variabilidad en la generación solar, asegurando continuidad en el suministro energético durante periodos sin radiación.

CONCLUSIONES

El análisis de la disponibilidad y comportamiento del recurso solar permitió establecer una base energética estable para el diseño del sistema; los valores de radiación solar y las horas pico solares evidencian una capacidad suficiente para sostener la generación fotovoltaica durante el año, aunque con variaciones diarias que condicionan la producción; esta lectura permitió ajustar el diseño hacia una configuración que responde a dichas fluctuaciones sin comprometer el suministro.

La evaluación del sistema de almacenamiento muestra que las baterías de litio seleccionadas permiten cubrir la demanda energética bajo condiciones de operación sin generación solar; la capacidad calculada y la autonomía de dos días establecen un margen de operación que favorece la continuidad del servicio; al mismo tiempo, la consideración de parámetros como la profundidad de descarga y el comportamiento del sistema permite proyectar un funcionamiento estable dentro de rangos operativos controlados.

El dimensionamiento de los componentes del sistema evidencia una relación coherente entre generación, almacenamiento y consumo; la selección de paneles solares, junto con la capacidad del sistema de baterías, permite cubrir la demanda energética del sistema de iluminación y mantener un margen adicional que compensa pérdidas y variaciones en la radiación; esta articulación técnica permite que el sistema opere sin interrupciones bajo condiciones promedio de uso.

El diseño del sistema de iluminación LED alimentado por energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio muestra un comportamiento energético equilibrado; la generación supera la demanda, el almacenamiento asegura continuidad y la eficiencia del sistema de iluminación reduce la carga energética; esta interacción entre componentes permite sostener el funcionamiento del sistema en condiciones reales de operación, evidenciando una propuesta técnica viable y consistente con los objetivos planteados.

REFERENCIAS

- Ahmadi, M. H., et al. (2018). Solar power technology for electricity generation: A critical review. *Energy Science & Engineering*, 6(5), 340–361. <https://doi.org/10.1002/ese3.256>
- Ajagbe, S. A., Adeaga, O. A., Alabi, O. O., Ikotun, A. B., Akintunde, M. A., & Adigun, M. O. (2024). Design and development of Arduino-based automation home system using the Internet of Things. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33(2), 767–776.
- Al-Shahri, O. A., et al. (2021). Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 284, 125465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125465>
- Aul, M. M., Enyia, J. D., & Lawal, T. (2022). Design and installation of a 3.5 kVA solar photovoltaic power system. *ATBU Journal of Science, Technology and Education*, 10(1), 319–330.
- Bhagyasri, K., Begum, D. S., Suhash, U. R., & Subhas, B. (2023). Smart billing system using Arduino. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 2(3), 2352–2357.
- Choubey, A., Mishra, S., Behera, S., Misra, R., Pandey, A. K., & Pandey, D. (2024). Smart homes, smart choices: Using big data to boost energy efficiency and environmental sustainability. *Electric Power Components and Systems*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/15325008.2024.2341334>
- Chung, H. (2024). Long-term usage of off-grid photovoltaic system with lithium-ion battery energy storage system. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2405.04225>
- Dubrovskaya, V., & Havrylenko, E. (2023). Analysis of the effectiveness of using solar systems based on photovoltaic modules and solar collectors for energy supply of budget facilities. *Power Engineering: Economics, Technique, Ecology*, 20(3), 57–67.
- Etukudoh, E. A., Nwokediegwu, Z. Q. S., Umoh, A. A., Ibekwe, K. I., Ilojiyanya, V. I., & Adefemi, A. A. (2024). Solar power integration in urban areas: A review of

- design innovations and efficiency enhancements. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), 1383–1394.
- Fan, Y., et al. (2024). Modeling and design of next-generation lithium metal batteries. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2410.15752>
- Fokeev, A., Subgatullin, B., & Ahmed, Y. E. (2019). Methods of electrical loads calculation and selection of electrical power equipment. In *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949977>
- Hasan, M., & Serra Altinoluk, A. (2023). Battery controllers of photovoltaic integrated battery energy storage systems. *Frontiers in Energy Research*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1139255>
- Halkos, G. E., & Gkampoura, E.-C. (2020). Reviewing usage, potentials, and limitations of renewable energy sources. *Energies*, 13(11), 2906. <https://doi.org/10.3390/en13112906>
- Jatav, R., Shrivastava, A., & Pandit, R. K. (2023). Energy and economic analysis of solar PV system for making heritage building self-sustainable. *International Journal of Science, Technology and Engineering*, 9(1), 9–14.
- Khairi, N. H., & Akimoto, Y. (2022). Suitability of rooftop solar photovoltaic at educational building towards energy sustainability in Malaysia. *Sustainable Horizons*, 3(2), 45–54.
- Kumar, A., et al. (2023). Photo-rechargeable lithium-ion batteries using TiS₂ cathode. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2301.06155>
- Li, G., Li, M., Taylor, R., Hao, Y., Besagni, G., & Markides, C. N. (2022). Solar energy utilisation: Current status and roll-out potential. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118331>
- Morais, J. C., Neves, N. C., Soveral, L. A., & Lima, J. (2024). Innovation in higher education institutions towards sustainability using LED technology. *International Journal of Innovation Science*, 16(2), 296–319. <https://doi.org/10.1108/IJIS-10-2022-0205>

- Pandey, A. K., Kumar, R., & Samykano, M. (2022). Solar energy: Direct and indirect methods to harvest usable energy. In *Dye-Sensitized Solar Cells* (pp. 1–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819631-8.00001-7>
- Ren, H. K., et al. (2022). Optimal sizing of solar photovoltaic and battery storage systems. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2306.03581>
- Sejati, R. N. W., & Dewi, O. C. (2024). Sustainable lighting through design and energy efficiency consumption of artificial lighting in educational building. *Emara: Indonesian Journal of Architecture*, *10*(1), 22–30.
- Seyitoğlu, S. S., Tozlu, Ö. F., & Avcioglu, E. (2023). Indoor lighting conversion approach for sustainable energy efficiency applications in campus buildings. *Gazi University Journal of Science*, *36*(3), 1326–1337.
- Sharkawy, A.-N., Hasanin, M., Sharf, M., Mohamed, M., & Elsheikh, A. (2022). Development of smart home applications based on Arduino and Android platforms. *Automation*, *3*(4), 579–595. <https://doi.org/10.3390/automation3040034>
- Shashavali, P., & Sankar, V. (2021). Switched redundancy and cutset approach to estimate probability indices of DC-DC converters. *International Journal of Renewable Energy Research*. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v11i3.12188.g8287>
- Stanley, O., & Kingsley, I. K. (2021). Energy consumption of appliances powered by sustainable energy systems. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*, *1*(1), 008–017.
- Yusop, A., Ahmad Yusry, S. A., Sulaiman, N. A., Khamil, K. N., & Mohd Isira, A. S. (2022). Solar energy harvester for pet GPS collar. *Przegląd Elektrotechniczny*, *98*(8), 47–51.
- Yu, L., Qin, S., Zhang, M., Shen, C., Jiang, T., & Guan, X. (2021). A review of deep reinforcement learning for smart building energy management. *IEEE Internet of Things Journal*, *8*(15), 12046–12063. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3032938>
- Zakri, A. A., Sunanda, W., & Kurniawan, R. (2023). The design of solar cell-based street lighting for school area. *Jurnal Ecotipe*, *10*(1), 31–38.

- Zhang, Y., et al. (2024). Experimental and numerical study on the aerodynamic performance of photovoltaic panels. *Solar Energy*, 256, 1234–1245. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.03.015>
- Zublie, M., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2023). Energy efficiency and feasibility analysis of solar power generation using hybrid system. *International Journal of Photoenergy*, 2023, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2023/xxxxxx>

ANEXOS

ANEXO 1. UBICACIÓN DEL PROYECTO

Sector : Troje del Sur

Ciudad : Quito

Provincia : Pichincha

Coordenadas : Latitud -0.3433°

Longitud -78.5767°

Altitud : 2 850 msnm



Vista del lugar de instalación

ANEXO 2. RECURSO SOLAR DEL SITIO

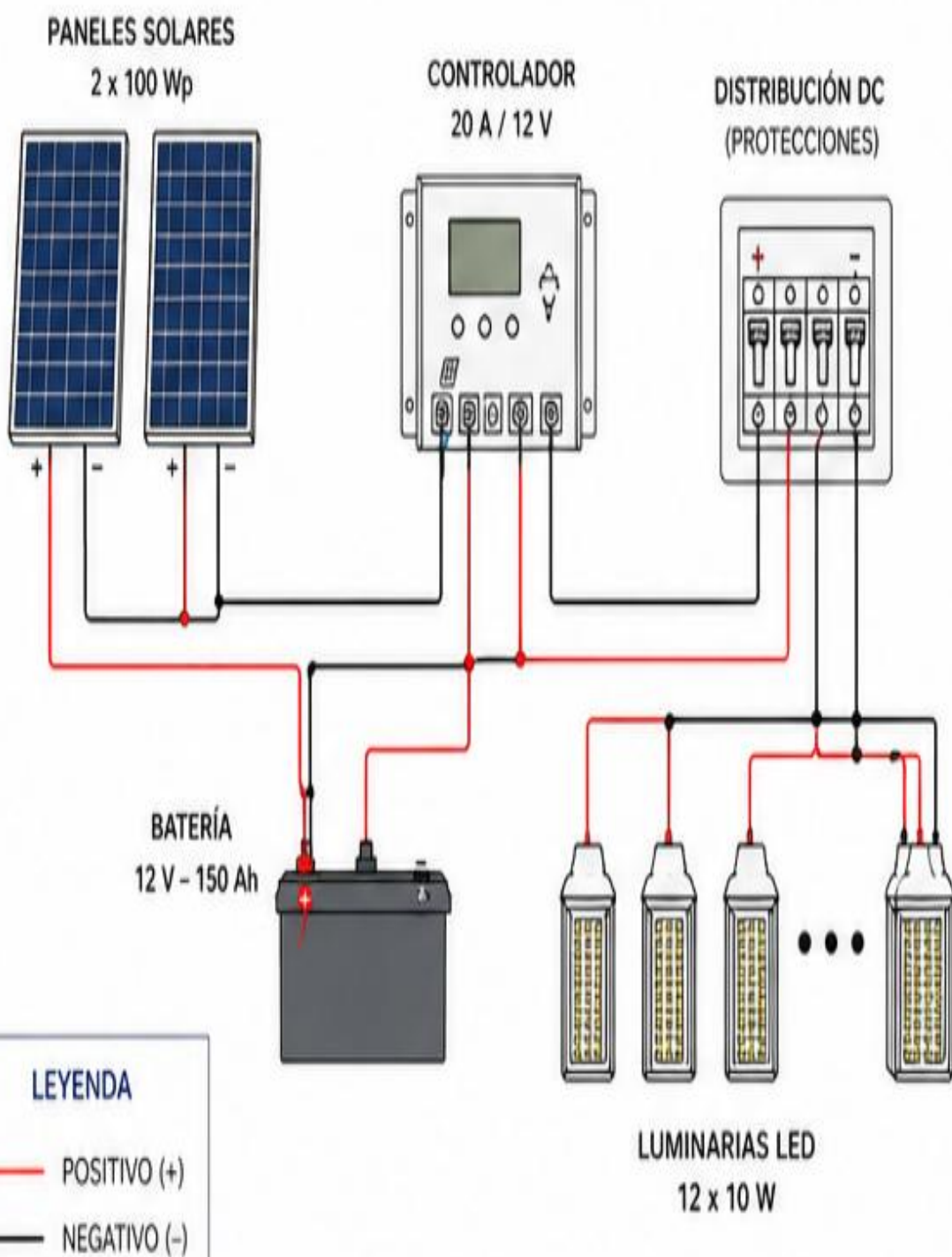
Tabla A2.1. Radiación solar mensual promedio

Mes	HSP (h/día)	Irradiación (kWh/m ² /día)
Enero	5.30	5.22
Febrero	5.20	5.18
Marzo	5.10	4.95
Abril	4.80	4.65
Mayo	4.70	4.50
Junio	4.60	4.35
Julio	4.80	4.70
Agosto	5.20	5.05
Septiembre	5.40	5.35
Octubre	5.30	5.20
Noviembre	5.20	5.10
Diciembre	5.30	5.20
Promedio anual	5.20	5.03

Notas:

- HSP: Horas sol pico equivalentes.
- Datos obtenidos de la base de datos NASA - POWER.

ANEXO 3. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA



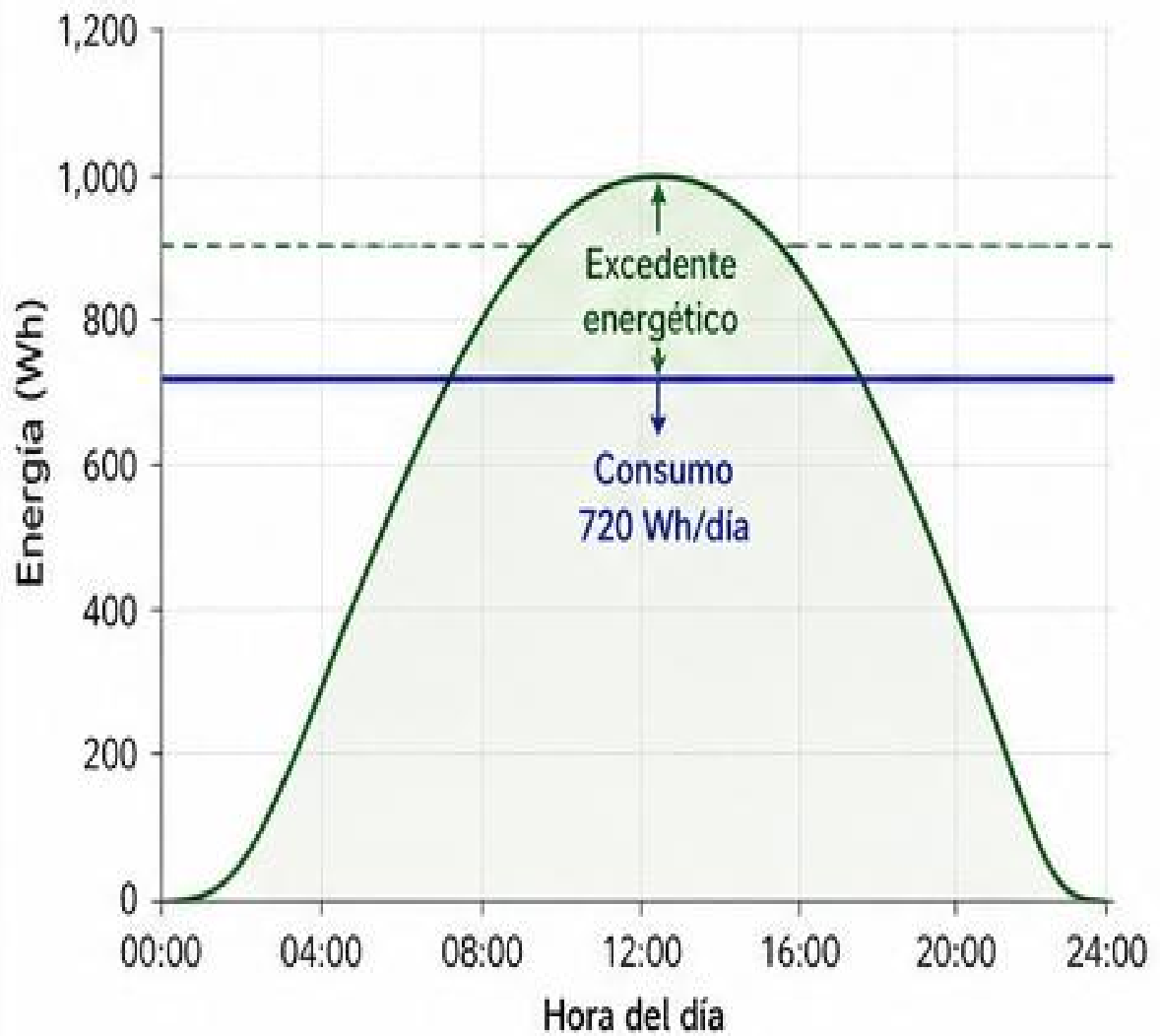
ANEXO 4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS COMPONENTES

Componente	Especificación	Cantidad
Panel solar	100 Wp, 12 V, policristalino	2 unidades
Controlador de carga	20 A, 12 V / 24 V, PWM	1 unidad
Batería de litio	12 V, 150 Ah, LiFePO4	1 unidad
Luminaria LED	10 W, 12 V DC, IP65	12 unidades
Caja de protecciones DC	Interruptores, fusibles, porta fusibles	1 unidad
Cable solar	4 mm ² , doble aislamiento	Según diseño
Estructura de soporte	Acero galvanizado	1 unidad

Notas:

- Todos los componentes seleccionados cumplen con las normas IEC y RETIE.
- El sistema opera en corriente continua (DC).

ANEXO 5. CURVA DE GENERACIÓN VS CONSUMO DIARIO



- Generación fotovoltaica (900 Wh/día)
- Consumo energético (720 Wh/día)
- - - Excedente promedio (180 Wh/día)

ANEXO 6. INSTALACIÓN REFERENCIAL



Instalación de paneles solares



Controlador de carga



Batería de litio 12 V - 150 Ah



Iluminación LED en funcionamiento