ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA EL SISTEMA DE PORTERIA DEL CAMPAMENTO EPM

YENIFER TATIANA PARRA QUINTANA

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECNOLOGÍA EN SUPERVISIÓN DE SISTEMAS DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

GUADALUPE – ANTIOQUIA

2026

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA EL SISTEMA DE PORTERIA DEL CAMPAMENTO EPM

YENIFER TATIANA PARRA QUINTANA

Trabajo de grado para optar al título de Tecnóloga en Supervisión de sistemas de generación y distribución de energía eléctrica

Asesor técnico
Jauder Alexander Ocampo Toro
Doctor en Ingeniería

Asesor metodológico
Andrés Felipe Romero Maya
Magíster en Energía

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECNOLOGÍA EN SUPERVISIÓN DE SISTEMAS DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

GUADALUPE – ANTIOQUIA

2026

Contenido

Pág.

Introducción 13
1. Planteamiento del problema 15
1.1. Descripción 15
1.2. Formulación del problema 16
2. Justificación 17
3. Objetivos 19
3.1. Objetivo general 19
3.2. Objetivos específicos 19
4. Marco teórico 20
4.1. Contexto geográfico y recurso solar en Antioquia 20
4.2. Tipologías de sistemas fotovoltaicos 22
4.2.1. Sistemas aislados (Off-Grid) 22
4.2.2. Sistemas interconectados (On-Grid). 23
4.2.3. Sistemas híbridos. 23
4.3. Dimensionamiento y componentes técnicos críticos 24
4.3.1. Estimación de la demanda y cargas críticas. 25
4.3.2. Tecnologías de almacenamiento reciente. 25
4.4. Análisis económico y retorno de inversión 27
4.5. Marco normativo y regulatorio en Colombia 27
5. Metodología 29
5.1. Tipo de proyecto 29
5.2. Método 29
5.3. Instrumentos de recolección de información 30
6. Resultados 32
6.1. Situación energética actual de la portería 32
6.1.1. Caracterización de la infraestructura y equipos. 33
6.1.2. Diagnóstico del suministro eléctrico y confiabilidad 35
6.2. Dimensionamiento de sistema fotovoltaico (Off-Grid) 37

6.2.1. Estimación de demanda energética. 37
6.2.2. Dimensionamiento del generador fotovoltaico (Pwp). 38
6.2.3. Dimensionamiento banco de baterías (Cn). 40
6.2.4. Selección del regulador de carga ($Ireg$). 41
6.2.5. Selección de inversor ($Pinv$). 42
6.2.6. Costo económico de sistema (Off-Grid). 44
6.3. Dimensionamiento de sistema fotovoltaico (On-Grid) 44
6.3.1. Estimación de demanda energética. 44
6.3.2. Dimensionamiento generador fotovoltaico. 45
6.3.3. Dimensionamiento de inversor. 46
6.3.4. Costo económico de sistema (On-Grid). 46
6.4. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico (Híbrido) 47
6.4.1. Cálculo del generador fotovoltaico (Paneles). 47
6.4.2. Dimensionamiento del banco de baterías (respaldo). 48
6.4.3. Selección del inversor híbrido. 49
6.4.4. Costo económico de sistema (Hibrido). 50
6.5. Análisis financiero y viabilidad del proyecto 51
6.5.1. Supuestos y parámetros financieros estimados. 51
6.5.2. Análisis de costos e inversión inicial. 52
6.5.3. Proyección de ahorro y viabilidad económica. 54
6.5.4. Indicadores de viabilidad financiera. 57
6.6. Análisis con cargas adicionales 59
6.6.1. Componentes adicionales. 59
6.6.2. Estimación de demanda energética y componentes del sistema solar. 61
6.6.3. Selección de inversor híbrido. 61
6.6.4. Costo económico sistema hibrido con nuevas cargas 63
6.6.5. Análisis financiero. 63
Indicadores de viabilidad financiera. 64
7. Conclusiones 65
8. Recomendaciones 67
9. Referencias 69

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Comparativa de tecnologías de almacenamiento de energía. 25
Tabla 2. Cuadro de cargas y consumo energético diario. 35
Tabla 3. Consumo mes a mes con un total de días sin electricidad. 36
Tabla 4. Costo componentes Off-Grid. 44
Tabla 5. Costos componentes On-Grid. 47
Tabla 6. Costos componentes híbridos. 51
Tabla 7. Producción anual de cada sistema. 52
Tabla 8. Presupuesto detallado de inversión inicial sistema Off-Grid. 53
Tabla 9. Presupuesto detallado de inversión inicial sistema On-Grid. 53
Tabla 10. Presupuesto detallado de inversión inicial sistema híbrido. 54
Tabla 11. Ahorro anual promedio por sistema. 55
Tabla 12. Proyección de ahorros y flujo de caja sistema Off-Grid. 55
Tabla 13. Proyección de ahorros y flujo de caja sistema On-Grid. 56
Tabla 14. Proyección de ahorros y flujo de caja sistema hibrido. 57
Tabla 15. Indicadores financieros. 58
Tabla 16. Cuadro de cargas y consumo energético diario con componentes adicionales. 61
Tabla 17. Resultados de dimensionamiento con cargas adicionales. 62
Tabla 18. Costos componentes híbridos. 63
Tabla 19. Indicadores financieros sistema híbrido. 64
Tabla 20. Comparación sistema híbrido sin cargas adicionales y con cargas adicionales. 64

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Promedio multianual - Atlas de radiación solar de Colombia. 21
Figura 2. Sistema Off-Grid con esquemático. 22
Figura 3. Sistema On-Grid con esquemático. 23
Figura 4. Sistema Hibrido con esquemático. 24
Figura 5. Vista general de la portería El Limón. 32
Figura 6. Iluminación interna y externa de la portería. 33
Figura 7. Computador para registro de personal e informes. 34
Figura 8. Gabinete Rack de comunicaciones y seguridad. 34
Figura 9. Panel solar monocristalino de 455W 24V. 39
Figura 10. Batería 48 V 100Ah. 41
Figura 11. Regulador de carga (MPPT). 42
Figura 12. Inversor de 3kW a 48V. 43
Figura 13. inversor hibrido de 6kW a 48V. 50
Figura 14. Motores de puertas batientes con sistema de control inalámbrico. 60
Figura 15. Modem Wifi. 60
Figura 16. Inversor híbrido de 10kW a 48V. 62

Resumen

El problema de esta investigación es la vulnerabilidad energética de la Portería "El Limón" del campamento EPM en Guadalupe, Antioquia, debido a su dependencia de una red eléctrica inestable. Esto genera cortes frecuentes —hasta 82 días al año— que afectan sistemas críticos como el CCTV, el internet y el bienestar del personal de seguridad.

El objetivo del proyecto es diseñar un sistema de energía solar fotovoltaica que cubra la demanda eléctrica de la portería, garantizando continuidad operativa y sostenibilidad. Además, busca reducir la huella de carbono y alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La metodología aplicada es de tipo experimental y proyectiva, desarrollada en etapas: caracterización de la carga mediante inventario y mediciones reales, dimensionamiento de los componentes (paneles, inversores y baterías) con datos solares locales, y un análisis de viabilidad financiera.

Los resultados identifican una demanda de 4,518 Wh/día y una carga de 1,006 W. Se definieron tres configuraciones (Off-Grid, On-Grid e híbrida), destacando que el sistema autónomo requiere 4 paneles de 455Wp y 3 baterías de litio de 100Ah, logrando independencia frente a fallos del suministro eléctrico.

Palabras clave: Generación fotovoltaica, Sostenibilidad energética, Sistemas híbridos, Autonomía técnica.

Abstract

The focus of this research is the energy vulnerability of the “El Limón” guardhouse at the EPM camp in Guadalupe, Antioquia, due to its reliance on an unstable power grid. This results in frequent outages—up to 82 days a year—that affect critical systems such as CCTV, the internet, and the well-being of security personnel.

The project’s objective is to design a solar photovoltaic system that meets the guardhouse’s electricity demand, ensuring operational continuity and sustainability. Additionally, it aims to reduce the carbon footprint and align with the Sustainable Development Goals.

The methodology applied is experimental and project-based, developed in stages: load characterization through inventory and actual measurements, sizing of components (panels, inverters, and batteries) using local solar data, and a financial feasibility analysis.

The results identify a demand of 4,518 Wh/day and a load of 1,006 W. Three configurations were defined (Off-Grid, On-Grid, and hybrid), noting that the autonomous system requires 4 panels of 455 Wp and 3 lithium batteries of 100 Ah, achieving independence from power grid failures.

Keywords: Photovoltaic generation, Energy sustainability, Hybrid systems, Technical autonomy.

Glosario

Arreglo Fotovoltaico: Se define como el conjunto interconectado de módulos fotovoltaicos que funcionan como una sola unidad de generación de energía. Su función principal es la conversión directa de la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico (Messenger & Ventre, 2010).

Autonomía Energética: En el contexto de sistemas aislados, es la capacidad técnica de un sistema de generación para suministrar energía a las cargas conectadas durante un periodo determinado sin recurrir a fuentes externas o a la red eléctrica, basándose en la capacidad de almacenamiento disponible (Wenham et al., 2007).

Batería de Litio: Dispositivo de almacenamiento electroquímico que utiliza iones de litio como portadores de carga. Se caracteriza por su alta densidad energética, eficiencia en ciclos de carga/descarga y mayor vida útil en comparación con las baterías de plomo-ácido convencionales (Linden & Reddy, 2011).

Carga Eléctrica: Término que designa la potencia total demandada por los receptores o equipos conectados a un circuito eléctrico en un momento dado. En el diseño fotovoltaico, determina la capacidad requerida tanto de generación como de almacenamiento (Harper, 2013).

Controlador de Carga: Dispositivo electrónico encargado de regular el voltaje y la corriente proveniente de los paneles solares hacia las baterías. Su función es proteger el banco de baterías contra sobrecargas y descargas profundas, optimizando así su vida útil (Díaz, 2020).

Corriente Continua (CC): Tipo de corriente eléctrica en la que el flujo de carga eléctrica es unidireccional. Es la forma de energía generada nativamente por las celdas fotovoltaicas y almacenada en baterías antes de su inversión (Boxwell, 2017).

Corriente Alterna (CA): Corriente eléctrica cuya magnitud y dirección varían cíclicamente. Es el estándar global para la transmisión y distribución de electricidad, así como para la operación de la mayoría de los electrodomésticos residenciales e industriales (Harper, 2013).

Demanda Energética: Cantidad total de energía requerida por un sistema o usuario para satisfacer sus necesidades durante un intervalo de tiempo específico, usualmente expresada en kilovatios-hora (kWh). Es el parámetro base para el dimensionamiento de cualquier sistema de generación (Perpiñán, 2020).

Eficiencia Energética: Relación entre la energía útil obtenida de un sistema, proceso o tecnología y la energía total invertida en él. Implica la reducción del consumo de energía mediante el uso de tecnologías más avanzadas o mejores prácticas de gestión (IPCC, 2014).

Huella de Carbono: Indicador ambiental que cuantifica la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento

o producto, medido en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO2e) (Wiedmann & Minx, 2008).

Inversor Híbrido: Equipo de conversión de potencia capaz de gestionar bidireccionalmente la energía entre los paneles solares, las baterías, las cargas y, opcionalmente, la red eléctrica. Permite priorizar fuentes de energía y operar en modos conectados a la red o en modo isla (Kalogirou, 2014).

Irradiación Solar: Energía solar incidente por unidad de superficie acumulada durante un periodo de tiempo determinado (generalmente kWh/m² por día o año). Es la variable climatológica fundamental para calcular el potencial de generación de un sitio (Duffie & Beckman, 2013).

Sistema Autónomo (Off-Grid): Sistema de generación eléctrica que opera independientemente de la red de distribución pública. Requiere obligatoriamente un sistema de almacenamiento y/o generación auxiliar para garantizar el suministro continuo (Messenger & Ventre, 2010).

Sostenibilidad: Paradigma de desarrollo que busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas, equilibrando el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social (Naciones Unidas, 1987).

Vatímetro: Instrumento de medición eléctrica diseñado para cuantificar la potencia eléctrica activa en un circuito. Es esencial para la auditoría energética y la verificación del consumo real de los dispositivos (Harper, 2013).

Introducción

En el panorama energético global contemporáneo, la transición hacia fuentes de energía renovables se ha consolidado como un imperativo para mitigar los efectos del cambio climático y promover el desarrollo sostenible. Colombia, gracias a su ubicación geográfica privilegiada, presenta un potencial solar promedio excepcional de 4,5 kWh/m²/día, lo que posiciona a la energía solar fotovoltaica como una de las alternativas más viables y eficientes para la generación eléctrica descentralizada en el territorio nacional.

Dentro de este contexto de innovación tecnológica, las infraestructuras operativas de pequeña escala, como las estaciones de vigilancia y puntos de control, enfrentan desafíos significativos relacionados con la dependencia de la red eléctrica convencional. Específicamente, en la Portería "El Limón" del campamento EPM, la operatividad diaria se ve comprometida ante cortes frecuentes del servicio, lo cual afecta directamente el rendimiento de equipos críticos de seguridad y comunicación.

En la presente investigación se propone el diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica, diseñado para satisfacer la demanda energética de la mencionada portería. Con este proyecto se busca garantizar la autonomía técnica de equipos como cámaras de seguridad, sistemas de internet e iluminación, sino también alinearse con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU)al reducir la huella de carbono y fomentar el uso de tecnologías limpias en instalaciones industriales.

A lo largo de este documento, se desarrolla un diagnóstico detallado del consumo energético real de la portería, seguido por el dimensionamiento técnico de los componentes fotovoltaicos y un análisis de factibilidad económica. Con este enfoque, se pretende demostrar que la implementación de sistemas solares en infraestructuras de apoyo no es solo una medida de ahorro económico, sino una estrategia fundamental para la resiliencia operativa y la responsabilidad ambiental empresarial.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción

En el contexto actual de las infraestructuras de apoyo logístico y seguridad, la disponibilidad constante de energía eléctrica es un requisito crítico para garantizar la integridad operativa de cámaras, iluminación y comunicaciones. Sin embargo, pequeñas instalaciones como porterías y puntos de control suelen estar supeditadas a la infraestructura de la red eléctrica convencional, lo cual conlleva una serie de limitaciones técnicas y económicas.

La Portería "El Limón", ubicada en el campamento de EPM en el municipio de Guadalupe (Antioquia), no es ajena a esta realidad. Actualmente, su funcionamiento depende exclusivamente del suministro eléctrico tradicional, una fuente que no solo proviene mayoritariamente de recursos no renovables (como las termoeléctricas), sino que también está sujeta a la volatilidad de las tarifas del mercado energético nacional. Esta dependencia genera un gasto operativo mensual constante que impacta el presupuesto de mantenimiento de la infraestructura.

Más allá del factor económico, el problema principal radica en la inestabilidad del servicio. Los cortes de energía recurrentes en la zona interrumpen el funcionamiento de dispositivos esenciales para la seguridad y la logística, tales como:

Sistemas de vigilancia y cámaras: Cuya desconexión genera puntos ciegos y vulnerabilidades críticas en la seguridad del campamento.

Equipos de comunicación e informática: El computador y la red de internet, necesarios para el registro y reporte de novedades, quedan inoperativos, afectando la eficiencia del personal de vigilancia.

Equipos de bienestar y servicios básicos: La iluminación, ventiladores y el dispensador de agua dejan de prestar servicio, degradando las condiciones laborales del personal en sitio.

Esta situación evidencia una falta de resiliencia energética. Si no se implementa una solución alternativa, la portería continuará siendo vulnerable a fallos externos, manteniendo una huella de carbono innecesaria y costos operativos crecientes. Por lo tanto, se identifica la necesidad de realizar una transición hacia un modelo de autogeneración que proporcione autonomía, fiabilidad técnica y un compromiso real con la sostenibilidad ambiental mediante la energía solar fotovoltaica.

1.2. Formulación del problema

A partir de la problemática descrita, surge el siguiente interrogante de investigación:

¿De qué manera el diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica autónomo en la portería "El Limón" del campamento de EPM garantiza un suministro energético sostenible, eficiente y económicamente viable para su operación diaria?

2. Justificación

La ejecución de este proyecto se fundamenta en la necesidad de transformar la infraestructura energética de la portería "El Limón" en un sistema resiliente y eficiente. La importancia de esta investigación se sustenta en temas técnicos, económicos, ambientales y sociales.

La portería es el nodo central de seguridad y control del campamento EPM, albergando equipos críticos como cámaras de vigilancia, sistemas de internet por fibra óptica y equipos de cómputo. La dependencia exclusiva de la red convencional hace que la seguridad sea vulnerable ante fallos técnicos externos. La implementación de un sistema fotovoltaico con almacenamiento en baterías garantiza la continuidad operativa ininterrumpida, permitiendo que los sistemas de vigilancia permanezcan activos incluso durante contingencias eléctricas, eliminando así los puntos ciegos de seguridad.

Desde una perspectiva financiera, el proyecto se justifica por la reducción directa en los costos operativos fijos. Al generar su propia energía, la administración del campamento podrá mitigar el impacto del aumento constante de las tarifas eléctricas reguladas en Colombia. El uso de componentes como paneles de 550W y baterías de litio asegura una inversión con una vida útil prolongada, lo que se traduce en un ahorro acumulado significativo a largo plazo y una rápida recuperación de la inversión inicial estimada.

Alineado con Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU y con la Ley 1715 de 2014 en Colombia, los cuales son:

- **Transformación energética.** Transformar el presente y el futuro de la energía.
- **Economía circular.** Producción y consumo sostenible.
- **Gestión de proyectos.** Potenciar ofertas de valor futuro con proyectos que cumplan las expectativas en términos de alcance, costo, calidad y oportunidad pactadas.

Se estima que este proyecto contribuye directamente a la descarbonización de las operaciones del campamento. Al sustituir parte del consumo de la red (que puede provenir de fuentes térmicas) por energía limpia y renovable, se logra una reducción medible de la huella de carbono institucional. Esto refuerza el compromiso de EPM con la preservación del entorno natural en la zona de Guadalupe, Antioquia.

Finalmente, este proyecto posee un alto valor demostrativo. Se constituye como un modelo piloto de sostenibilidad que puede ser replicado en otras casetas de vigilancia o infraestructuras menores de la empresa. Además, mejora las condiciones laborales del personal de vigilancia al asegurar el funcionamiento de equipos de bienestar (ventiladores y dispensadores de agua) sin interrupciones, fomentando una cultura de uso responsable de los recursos energéticos dentro del campamento.

3. Objetivos

3.1.Objetivo general

Diseñar un sistema de energía solar fotovoltaica para suplir la demanda eléctrica de la Portería "El Limón" del campamento EPM del municipio de Guadalupe (Antioquia), garantizando la continuidad operativa y la sostenibilidad del servicio.

3.2.Objetivos específicos

- Caracterizar la carga eléctrica de la portería mediante el inventario de equipos y la medición de consumos reales determinando la demanda energética diaria (kWh/día) y proyectando la capacidad necesaria para futuras ampliaciones de carga.

- Dimensionar los componentes técnicos del sistema fotovoltaico (paneles, inversor, regulador y banco de baterías) considerando las condiciones de radiación solar de la zona y los requerimientos de autonomía.

- Formular el análisis financiero y presupuesto detallado del proyecto, evaluando la viabilidad económica frente al ahorro proyectado en el consumo de la red convencional.

4. Marco teórico

4.1. Contexto geográfico y recurso solar en Antioquia

Para la implementación de sistemas fotovoltaicos en el municipio de Guadalupe, Antioquia, es imperativo analizar las condiciones meteorológicas locales. Según el Atlas de radiación solar de Colombia y estudios recientes del IDEAM, la región andina antioqueña presenta niveles de irradiación que oscilan entre 4.0 y 5.0 kWh/m²/día (ver Figura 1), con variaciones sujetas a factores como la altitud y la nubosidad típica del clima templado (UPME & IDEAM, 2019).

La eficiencia de los módulos fotovoltaicos tiene una relación inversa con la temperatura ambiente. En climas templados como el de Guadalupe, se observa que los módulos operan en condiciones más próximas a sus Condiciones Estándar de Prueba (STC) en comparación con zonas costeras muy calurosas, lo cual optimiza el rendimiento global del sistema al reducir las pérdidas por coeficiente de temperatura (Villada et al., 2021).

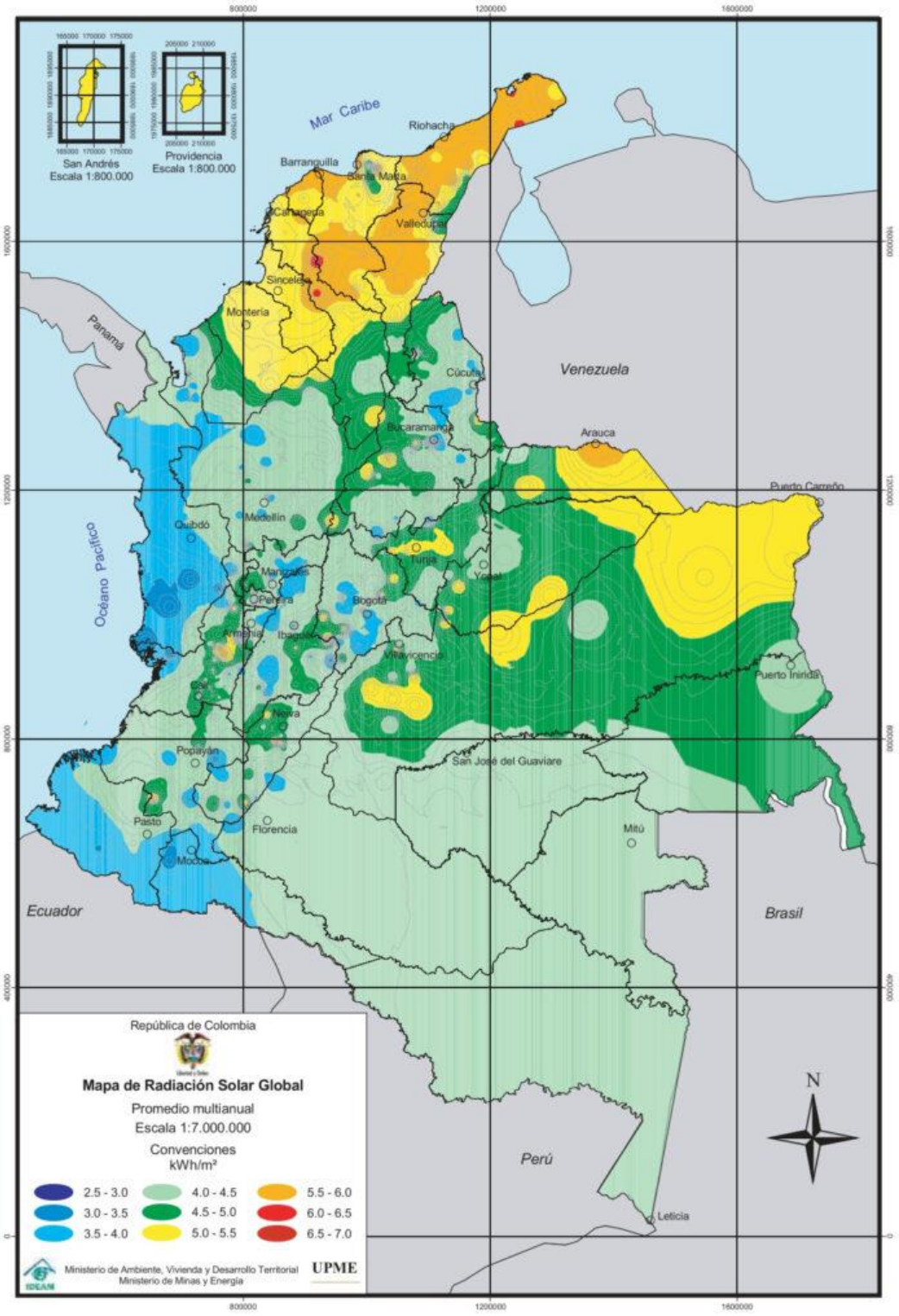


Figura 1. Promedio multianual - Atlas de radiación solar de Colombia.
Fuente: UPME - IDEAM, 2019.

4.2.Tipologías de sistemas fotovoltaicos

Dado que el diseño final dependerá de la seguridad energética requerida para la portería, es fundamental contrastar las tres configuraciones posibles: sistema aislado (Off-Grid), sistema interconectado (On-Grid) y sistema hibrido.

4.2.1. Sistemas aislados (Off-Grid). Estos sistemas operan independientemente de la red eléctrica. Son ideales para zonas donde la red es inestable o inexistente. Requieren obligatoriamente un banco de baterías dimensionado para cubrir días de autonomía Su principal ventaja es la independencia total, pero su costo inicial es elevado debido al almacenamiento (Giraldo & Henao, 2022). En la Figura 2 se presenta el diagrama esquemático de una configuración típica de conexión Off-Grid.

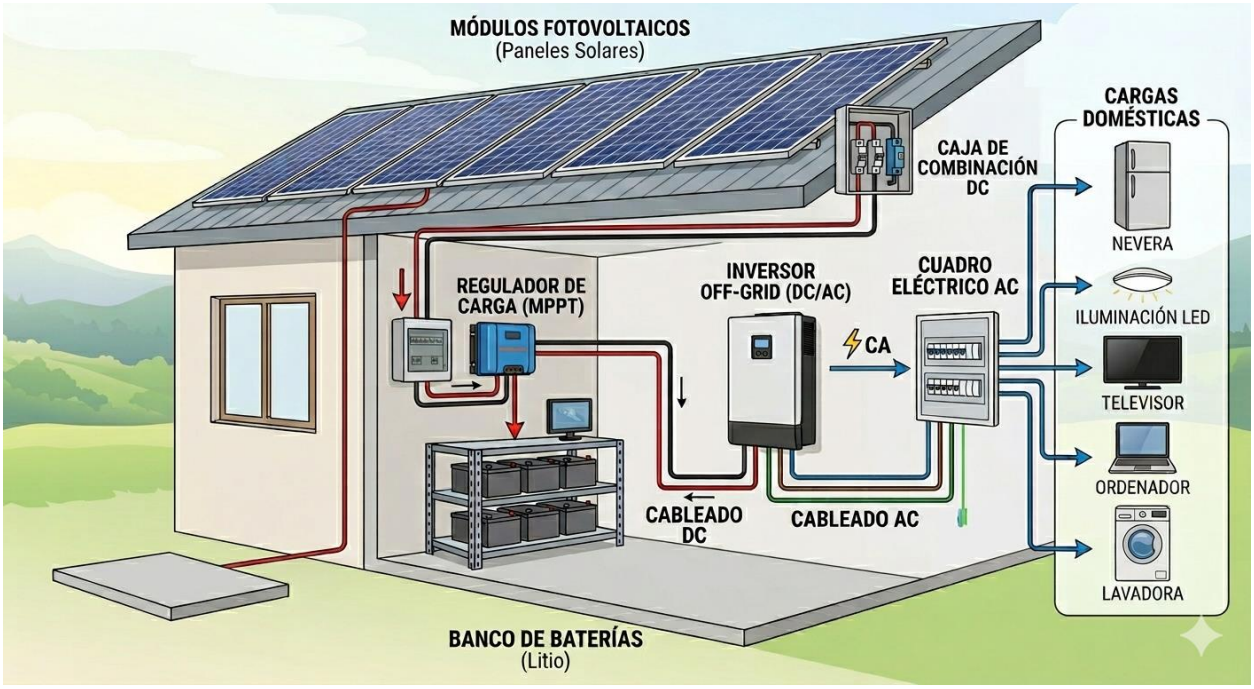


Figura 2. Sistema Off-Grid con esquemático.
Fuente: Nano Banana (2026). Sistema Off-Grid con esquemático [Generado por IA]. https://shre.ink/LN0A

4.2.2. Sistemas interconectados (On-Grid). Estos sistemas operan en sincronía con la red eléctrica convencional. No requieren baterías, ya que la red actúa como respaldo. Cuando la generación solar supera el consumo, los excedentes se inyectan a la red (exportación), y cuando es deficitaria, se consume de la red. Representan una menor inversión inicial, pero si la red falla, el sistema cesa su operación de manera automática por seguridad (protección anti-isla) (Celis & Rodríguez, 2023). En la Figura 3 se ilustra el flujo energético de esta configuración.

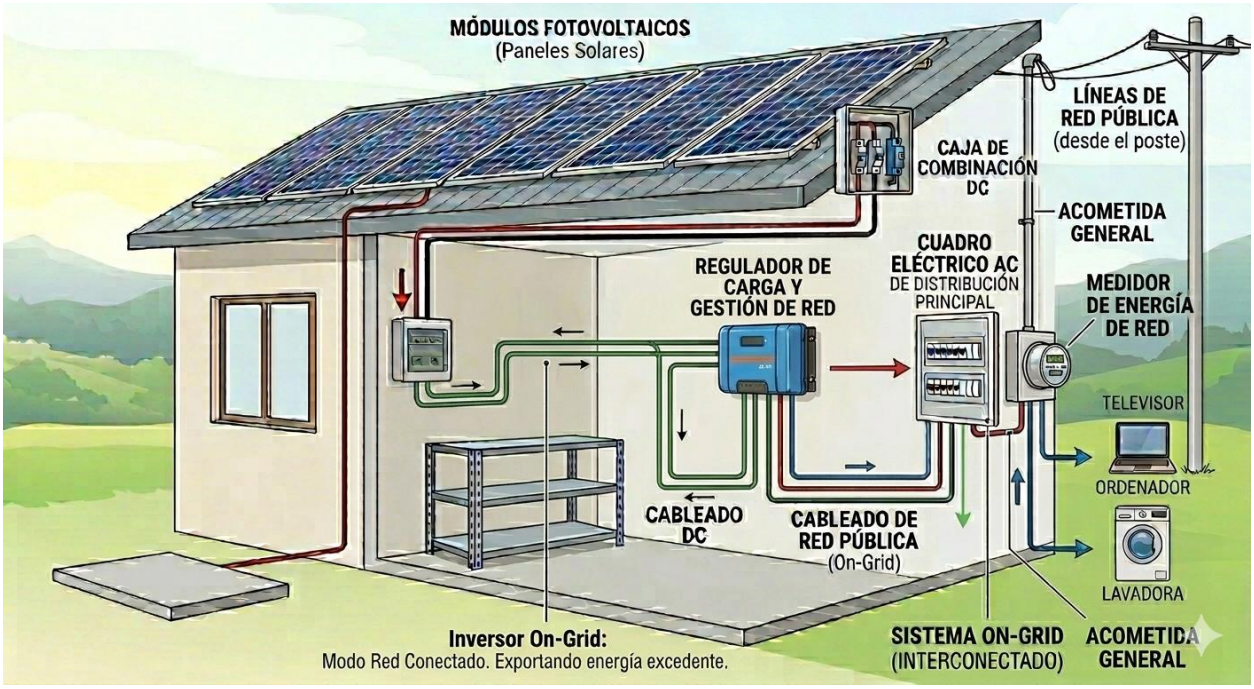


Figura 3. Sistema On-Grid con esquemático.
Fuente: Nano Banana (2026). Sistema On-Grid con esquemático [Generado por IA]. https://shre.ink/LN0A

4.2.3. Sistemas híbridos. Integran las funcionalidades de las configuraciones aisladas y conectadas a la red y almacenamiento en baterías. Permiten gestionar la energía de forma inteligente (*Peak Shaving*) y ofrecen respaldo (*backup*) ante interrupciones del suministro eléctrico, lo cual es crítico para sistemas de seguridad en una portería (cámaras, talanqueras).

Aunque presenta la mayor inversión inicial debido a la complejidad de su gestión energética., ofrece la mayor confiabilidad operativa (Zhang et al., 2021). En la Figura 4 se ve el diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico híbrido con gestión de cargas críticas y respaldo en baterías.

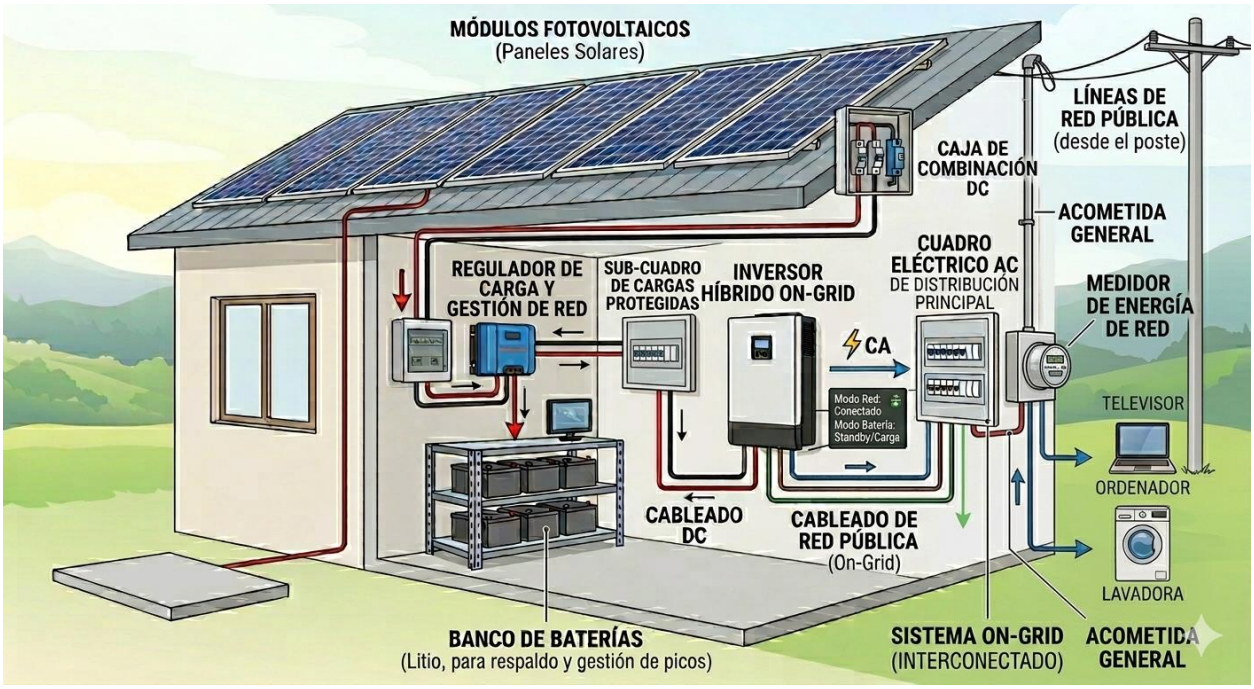


Figura 4. Sistema Hibrido con esquemático.
Fuente: Nano Banana (2026). Sistema hibrido con esquemático [Generado con IA]. https://shre.ink/LN0A

4.3. Dimensionamiento y componentes técnicos críticos

El dimensionamiento correcto es un pilar fundamental en el diseño de cualquier sistema energético, ya que no solo asegura la vida útil del proyecto y evita sobrecostos operativos, sino que garantiza la confiabilidad del suministro ante variaciones imprevistas. Para lograr un equilibrio técnico-económico óptimo, es indispensable realizar un análisis detallado que parta de la estimación precisa de la demanda y las cargas críticas, asegurando que el sistema responda a

las necesidades reales de consumo. Asimismo, la selección de tecnologías de almacenamiento reciente juega un rol decisivo, pues determina la eficiencia en la gestión de la energía y la autonomía del sistema a largo plazo.

4.3.1. Estimación de la demanda y cargas críticas. La caracterización de la carga en una portería debe diferenciar entre cargas esenciales (seguridad, comunicaciones) y no esenciales. Según la norma NTC 2050, el cálculo de la demanda debe considerar el factor de simultaneidad, ya que no todos los equipos operan al mismo tiempo (ICONTEC, 2020).

4.3.2. Tecnologías de almacenamiento reciente. Para el periodo 2020-2024, la literatura sugiere una transición de baterías de Plomo-Ácido (Gel/AGM) hacia tecnologías de Litio-Ferro fosfato (LiFePO4). Estas últimas, aunque requieren mayor inversión inicial, ofrecen una vida útil superior (hasta 6000 ciclos) y una profundidad de descarga (DoD) del 80-90%, frente al 50% del plomo, lo que optimiza el espacio físico en la portería (Li et al., 2022). En la Tabla 1 se muestran las diferentes tecnologías de baterías que se encuentran en el mercado, como sus características principales, ventajas, desventajas y vida útil estimada.

Tabla 1.
Comparativa de tecnologías de almacenamiento de energía.

Tecnología	Características Principales	Ventajas (Pros)	Desventajas (Contras)	Vida Útil (Ciclos)
Plomo-Ácido Abierto (Inundadas)	• Electrolito líquido (ácido sulfúrico).	• Costo inicial muy bajo.	• Mantenimiento constante (riesgo si se olvida).	500 - 800 ciclos
	• Requieren mantenimiento periódico (agua destilada).	• Robustez y fiabilidad comprobada.	• Emiten gases (necesitan ventilación).	

Tabla 2.
(Continuación).

	• Tecnología más antigua y probada.	• Reciclaje sencillo y establecido.	• Baja densidad energética (pesadas/grandes).	
			• Baja profundidad de descarga (máx 50%).	
Plomo-Ácido VRLA (Gel / AGM)	• Selladas, electrolito gelificado o absorbido.	• No requieren mantenimiento.	• Sensibles a sobrecargas (se secan).	600 - 1.000 ciclos
	• Libres de mantenimiento.	• Instalación en cualquier posición (excepto invertidas).	• Costo medio (más caras que las abiertas).	
	• Válvula de regulación de gases.	• Menor auto descarga que las abiertas.	• Vida útil moderada si se descargan profundo.	
		• Seguras para espacios cerrados.	• Pesadas.	
Ion-Litio (Li-ion / NMC)	• Usadas comúnmente en electrónica y vehículos eléctricos.	• Muy ligeras y compactas.	• Riesgo térmico (fugas térmicas si fallan).	1.500 - 3.000 ciclos
	• Alta densidad energética.	• Alta eficiencia de carga/descarga (95%+).	• Requieren BMS (Battery Management System) complejo.	
	• Química Níquel-Manganeso-Cobalto.	• Carga muy rápida.	• Vida útil menor que LiFePO4.	
			• Costo elevado.	
Litio-Ferro fosfato (LiFePO4 / LFP)	• La tecnología estándar actual para solar estacionaria.	• Seguridad: Muy difícil que se incendien.	• Costo inicial alto (aunque el costo por ciclo es el mejor).	3.000 - 6.000+ ciclos
	• Química más estable y segura del litio.	• Vida útil extremadamente larga.	• Requieren BMS específico.	
	• Voltaje nominal de celda 3.2V.	• Profundidad de descarga profunda (hasta 90-100%).	• Rendimiento cae bajo 0°C (no aplica en Guadalupe).	
		• Peso ligero (1/3 del plomo).		
		• Mantenimiento cero.		

Fuente: Construcción propia, con datos de (Huggins, 2016).

4.4. Análisis económico y retorno de inversión

La evaluación financiera en proyectos de EPM o infraestructuras similares debe contemplar el gasto de capital como los gastos operativos.

En Colombia, el aumento de tarifas reguladas ha incrementado el atractivo financiero de los proyectos de autogeneración reduciendo los periodos de recuperación de la inversión (*payback*) en periodos de retorno de 4 a 6 años para sistemas sin baterías, y de 7 a 9 para híbridos (García & López, 2023).

4.5. Marco normativo y regulatorio en Colombia

El marco legal colombiano ha evolucionado significativamente para facilitar la integración de renovables.

Ley 2099 de 2021 (Ley de Transición Energética): Actualiza y fortalece la Ley 1715 de 2014, mejorando los incentivos tributarios como la deducción de renta, exclusión de IVA y exención de aranceles para equipos de monitoreo y baterías, esto aplicando las certificaciones ante la UPME (Congreso de la República, 2021).

Resolución CREG 174 de 2021: Regula la autogeneración a pequeña escala (AGPE) y la entrega de excedentes a la red. (CREG, 2021).

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE): Actualizaciones recientes exigen certificaciones específicas para inversores y paneles utilizados en instalaciones conectadas o aisladas (MinEnergía, 2023).

5. Metodología

5.1. Tipo de proyecto

El presente estudio se define como un proyecto de investigación con enfoque experimental y tecnológico. Según QuestionPro (2021), la investigación experimental es aquella realizada con un enfoque científico, donde un conjunto de variables se mantiene constantes, mientras que otro conjunto se mide como sujeto del experimento. En este caso, se configuran variables técnicas del sistema fotovoltaico (dimensionamiento, configuración de equipos) para observar su efecto en la variable dependiente, que es la eficiencia energética y la autonomía de la portería “El Limón” del campamento EPM.

Además, tiene un carácter proyectivo, ya que busca proponer una solución factible a un problema práctico de ingeniería (suministro energético sostenible) mediante el diseño de un sistema real.

5.2. Método

Para el desarrollo del proyecto se tendrán en cuenta las siguientes actividades secuenciales, diseñadas para dar cumplimiento a los objetivos específicos planteados:

Para caracterizar la carga eléctrica y determinar la demanda energética, se iniciará con la realización de un inventario detallado de los equipos existentes en la portería (cámaras, iluminación, talanqueras, equipos de cómputo), seguido de la medición en sitio de los consumos

reales para establecer el perfil de carga diario (kWh/día). También se contempla la inclusión de una ampliación en la instalación para conectar otros equipos (como motores para las puertas de acceso y sistemas de comunicación inalámbrica).

Posteriormente, para dimensionar los componentes técnicos, se procederá a analizar las condiciones de radiación solar específicas de Guadalupe (Antioquia). Con estos datos, se realizarán los cálculos de ingeniería para seleccionar los paneles solares, el inversor, el regulador y el banco de baterías necesarios para garantizar la autonomía requerida.

Una vez definido el diseño, se realizará el análisis financiero y presupuesto, evaluando la viabilidad económica del proyecto frente a los costos de la red convencional.

5.3. Instrumentos de recolección de información

5.3.1. Fuentes primarias:

Las fuentes primarias serán los datos obtenidos directamente en campo, tales como:

- Mediciones de consumo eléctrico realizadas con analizadores de redes o pinzas amperimétricas en la portería.
- Fichas técnicas de los fabricantes de los paneles solares, inversores y baterías seleccionados.
- Normativa técnica vigente aplicable al proyecto (RETIE, NTC 2050).

5.3.2. Fuentes secundarias:

Las fuentes secundarias corresponderán a la revisión bibliográfica especializada, incluyendo:

- Bases de datos meteorológicas (IDEAM, NASA POWER) para la radiación solar en Guadalupe.
- Libros de ingeniería fotovoltaica, artículos de revistas científicas indexadas y tesis de grado relacionadas con sistemas solares autónomos o híbridos.
- Manuales de buenas prácticas de instalación de sistemas fotovoltaicos.

6. Resultados

6.1. Situación energética actual de la portería

La portería “El Limón” representa el punto crítico de control y comunicaciones del complejo. Actualmente, su funcionamiento depende exclusivamente de la red de distribución eléctrica convencional. Sin embargo, esta infraestructura presenta deficiencias significativas que comprometen la operatividad y la seguridad del recinto. En la Figura 5 se observa la portería de manera general.

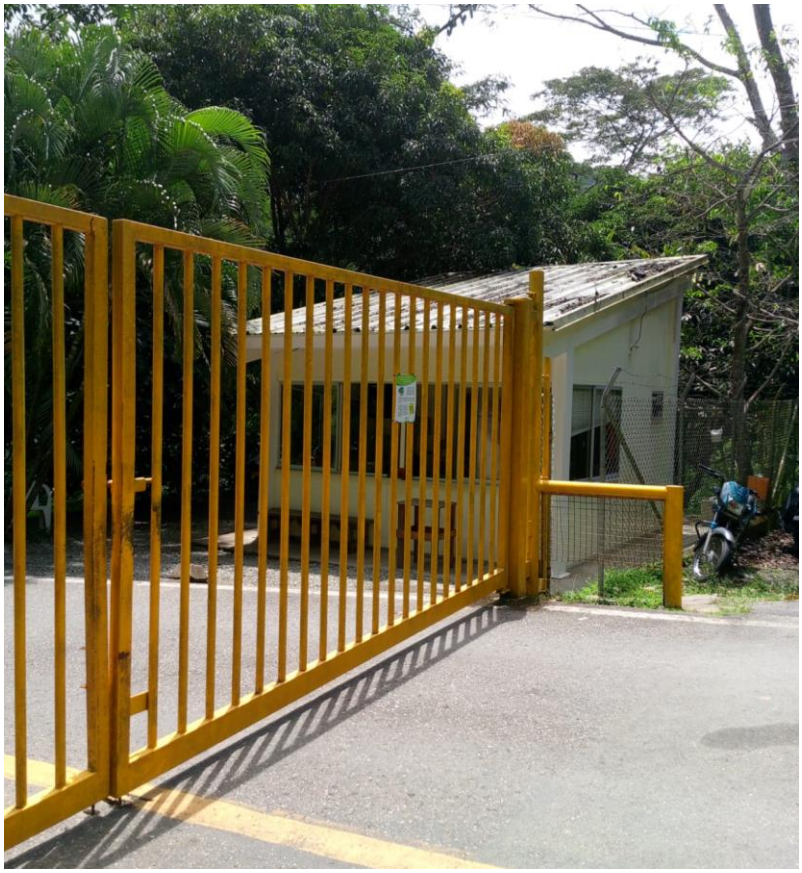


Figura 5. Vista general de la portería “El Limón”.
Fuente: Elaboración propia.

6.1.1. Caracterización de la infraestructura y equipos. La carga eléctrica de la portería está compuesta por equipos esenciales para la vigilancia, el registro de acceso y las comunicaciones externas e internas. Entre los activos tecnológicos identificados que requieren un suministro constante de energía se encuentran:

Sistemas de iluminación: Distribución de luminarias y cobertura del sistema de iluminación perimetral en la portería “El Limón” (ver Figura 6).



Figura 6. Iluminación interna y externa de la portería.
Fuente: Elaboración propia.

Equipos de ofimática: Estación de trabajo (PC), monitor y hardware dedicado al procesamiento y registro de bases de datos para el control de acceso (ver Figura 7).

Sistemas de comunicación: Estaciones de carga para equipos de radiocomunicación (VHF) y terminales de telefonía para la coordinación operativa.



Figura 7. Computador para registro de personal e informes.
Fuente: Elaboración propia.

Seguridad electrónica: Circuito Cerrado de Televisión (CCTV) y grabadores de video digital (DVR/NVR), los cuales demandan un suministro energético ininterrumpido las 24 horas del día (ver Figura 8).



Figura 8. Gabinete Rack de comunicaciones y seguridad.
Fuente: Elaboración propia.

Confort: Dispensador de agua con ciclos de enfriamiento y calentamiento, y equipos de ventilación mecánica destinados al confort térmico del personal de vigilancia.

En la Tabla 2 se detalla el inventario de cargas de la portería “El Limón”, donde se relacionan las potencias nominales, las horas de operación estimada y el consumo energético diario. Este levantamiento de información permite establecer la base técnica para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, identificando una demanda energética total de 4.518 Wh/día y una carga instalada de 1.006 W.

Tabla 3.
Cuadro de cargas y consumo energético diario.

Ítem	Equipo	Cantidad	Potencia Unit. (W)	Potencia total (W)	Horas de uso/Dia	Energía diaria (Wh/día)
1	Iluminación Led	7	12	84	12	1.008
2	Ofimática	1	200	200	10	2.000
3	Sistema de comunicación	1	12	12	6	72
4	Sistema de seguridad	1	50	50	24	1.200
5	Dispensador de agua	1	660	660	0.36	238
Total				**1.006**		**4.518**

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2. Diagnóstico del suministro eléctrico y confiabilidad. El suministro eléctrico actual se caracteriza por la aleatoriedad de las interrupciones. Según los registros operativos (ver Tabla 3), la disponibilidad del servicio no sigue un patrón estacional o programado, clasificándose como un suministro de baja confiabilidad operativa.

Tabla 4.
Consumo mes a mes con un total de días sin electricidad.

Ítems	Mes	Días sin electricidad				Total, días sin electricidad	Consumo (kWh/mes)
		Sem 1	Sem 2	Sem 3	Sem 4		
1	Abril	0	2	1	3	6	127,88
2	Mayo	1	0	2	3	6	126,95
3	Junio	3	0	4	2	9	122,34
4	Julio	0	1	5	4	10	120,11
5	Agosto	2	0	1	3	6	128,22
6	Septiembre	4	1	0	5	10	119,68
7	Octubre	0	3	2	6	11	118,57
8	Noviembre	1	0	2	2	5	129,44
9	Diciembre	3	4	0	5	12	117,95
10	Enero	0	2	1	4	7	125,63
11	Febrero	0	0	0	0	0	134,88
12	Marzo	0	0	0	0	0	136,12
Total						**82**	**1507,77**

Fuente: Construcción propia con datos de consumo EPM.

Se han identificado los siguientes escenarios de falla:

Inestabilidad semanal: Periodos donde se registran interrupciones totales del servicio durante dos o más días por semana.

Colapso prolongado: Eventos críticos donde la ausencia de suministro eléctrico se extiende por una semana completa, dejando a la portería en una vulnerabilidad operativa total.

Periodos de estabilidad aparente: Intervalos de hasta dos meses sin fallos, lo cual puede inducir a una subestimación del riesgo operativo que dificulta la planificación de contingencias.

6.2. Dimensionamiento de sistema fotovoltaico (Off-Grid)

Para dimensionar un sistema fotovoltaico aislado, se sigue una metodología técnica que asegura la confiabilidad del suministro, debido a que no se tiene red eléctrica como suplemento, el sistema depende totalmente de su propia generación y almacenamiento.

6.2.1. Estimación de demanda energética. Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 2 se determina mediante la sumatoria del producto entre la potencia de cada equipo por la cantidad de horas de uso.

$$E_d = \sum(p_i \cdot t_i) \quad (1)$$

Pi: Potencia del equipo en Watts (W).

Ti: Tiempo de uso diario en horas (h).

Ed: Energía diaria consumida en Watt-hora por día (Wh/día).

$$E_d = 4.518\ \text{Wh/día}$$

Para el diseño, es vital considerar las pérdidas por eficiencia del sistema (η), que suelen rondar entre el **70% y 85%** (considerando pérdidas en cables, baterías e inversor). Se tomará un estimado para este del 80%.

$$E_{real} = \frac{E_d}{\eta} = \frac{4.518 \text{ Wh/día}}{0.80} = 5.647{,}5 \text{ Wh/día}$$

6.2.2. Dimensionamiento del generador fotovoltaico (P_{wp}). Aquí se calcula cuántos paneles se necesitan para cubrir esa energía usando la radiación vista en la Figura 1 (4.5 HSP).

$$P_{wp} = \frac{E_{real}}{HSP \cdot f_s} \qquad (2)$$

P_{wp}: Potencia pico del arreglo fotovoltaico (Wp).

HSP: Horas Sol Pico.

f_s: Factor de seguridad o ensuciamiento (típicamente **0.9**).

$$P_{wp} = \frac{5.647{,}5 \text{ Wh/día}}{4.5 \cdot 0.9} = 1.394{,}4Wp$$

Selección de paneles: Para alcanzar ~1.394,4 Wp, se selecciona paneles comerciales de alta potencia (ej. 455 Wp o 550 Wp). Debido a que estos utilizan tecnologías más modernas, esto genera una mayor eficiencia generando más energía en menos superficie, asimismo, se optimizan

los costos asociados a la estructura de soporte de montaje y ejecución para la misma. Por tanto, para el proyecto se sugiere utilizar paneles de 455 Wp (Monocristalinos) (ver Figura 9).

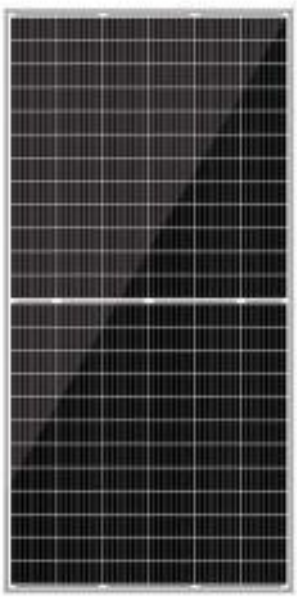


Figura 9. Panel solar monocristalino de 455W 24V.
Fuente: https://shre.ink/AsUf

$$N_p = \frac{P_{wp}}{P_{panel}} \qquad (3)$$

N_p: Cantidad de paneles.

P_{panel}: Potencia del panel.

Observación: Puesto que los demás equipos y el sistema en general van a operar a un potencial de 48 V, y cada panel entrega solo 24 V, se debe considerar la conexión en serie de pares de paneles (para sumar los 48 V). Es decir, N_p debe ser un número par.

$$N_p = \frac{1.394{,}4Wp}{455Wp} = 3.1 \approx 4\ paneles$$

6.2.3. Dimensionamiento banco de baterías (C_n). El sistema de almacenamiento constituye el componente crítico de un sistema Off-Grid, donde se establece el número de días de autonomía (N) (cuánto tiempo funciona el sistema sin sol). Para el caso de estudio se tomará típicamente 2 días.

$$C_n = \frac{E_d \cdot N}{V_{sys} \cdot DoD \cdot \eta_{bat}} \qquad (4)$$

C_n: Capacidad nominal necesaria en Amperios-hora (Ah).

V_{sys}: Voltaje del sistema (48 V).

DoD: Profundidad de descarga (0.8 para Litio).

η_{bat}: Eficiencia de la batería (aprox. 0.95).

$$C_n = \frac{4.518\ \text{Wh/día} \cdot 2\ dias}{48\ V \cdot 0.8 \cdot 0.95} = \frac{9.036\ \text{Wh}}{36.48\ V} = 247.7Ah$$

Se elige un sistema a 48V con 3 baterías de 100 Ah (ver Figura 10) para mayor eficiencia y optimización de la sección transversal de los conductores con una profundidad de Descarga (DoD) Litio: 80% (0.8) (ver Figura 10).



Figura 10. Batería 48 V 100Ah.
Fuente: https://shre.ink/LhdI

6.2.4. Selección del regulador de carga (I_{reg}). El regulador de carga gestiona el flujo energético y protege el banco de almacenamiento. Su dimensionamiento se rige por la corriente máxima de salida hacia las baterías.

$$I_{reg} = \frac{P_{wp}}{V_{sys}} \cdot 1.25 \qquad (5)$$

$$I_{reg} = \frac{1.394{,}4Wp}{48\ V} \cdot 1.25 = 36.31\ A$$

Para esta cantidad de corriente se selecciona un regulador con una capacidad nominal de 60A (ver Figura 11).

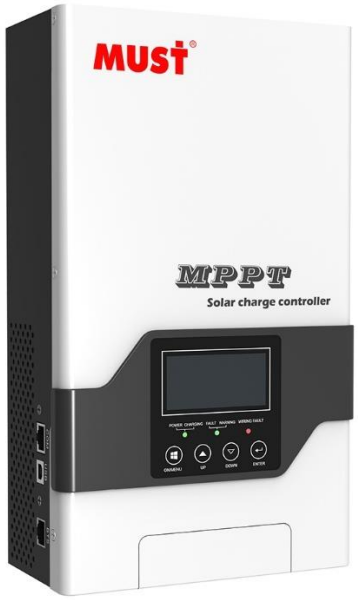


Figura 11. Regulador de carga (MPPT).
Fuente: https://shre.ink/LhpL

6.2.5. Selección de inversor (P_{inv}). Su dimensionamiento se fundamenta en la potencia nominal simultanea que debe entregar de forma continua. Se calcula sumando las potencias de todos los equipos que se planea utilizar simultáneamente, considerando un factor de sobredimensionamiento para absorber corrientes de inrush (picos de arranque).

$$P_{inv} = (\sum P_n) \cdot 1.25 \qquad (6)$$

P_{inv}: Potencia del inversor.

P_{inv}: Suma de las potencias nominales (Ver Tabla 2)

$$P_{inv} = 1006W \cdot 1.25 = 1257.5W$$

Se selecciona un inversor de 3000 W (3 kW) a 48 VDC con salida de onda senoidal pura. Esta elección se justifica por la necesidad de mantener un margen de operación del 42% sobre la carga máxima simultánea calculada ($1257.5 W), garantizando una mayor eficiencia térmica, permitiendo futuras ampliaciones menores del sistema y asegurando la compatibilidad con el mercado de equipos para aplicaciones a 48V (ver Figura 12).



Figura 12. Inversor de 3kW a 48V.
Fuente: https://shre.ink/Lh8r

6.2.6. Costo económico de sistema (Off-Grid). En la Tabla 4 se aprecia el desglose de costos directos asociados a los componentes principales de los componentes excluyendo la infraestructura de soporte y los costos de implementación.

Tabla 5.
Costo componentes Off-Grid.

Ítems	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Total
1	Panel solar 455Wp Monocristalino	4	$ 594.693,00	$ 2.378.772,00
2	Batería 48V 100Ah Litio	3	$ 4.276.563,00	$ 12.829.689,00
3	Regulador de carga 48V MPPT	1	$ 875.176,00	$ 875.176,00
4	Inversor 48V 3kW	1	$ 1.706.743,00	$ 1.706.743,00
			Total	$ 17.790.380,00

Fuente: Construcción propia con datos de https://shre.ink/Lq2D

6.3. Dimensionamiento de sistema fotovoltaico (On-Grid)

A diferencia del sistema Off-Grid donde se sumaba aparato por aparato aquí se utiliza un historial de facturación eléctrica kWh/mes (ver Tabla 3), que permite analizar con mayor precisión la curva de carga y el comportamiento en términos generares y poder así compensar el consumo diario promedio y generar excedentes para compensar el gasto económico.

6.3.1. Estimación de demanda energética. Para determinar un consumo diario es necesario promediar este con todos los meses, alrededor de 12 meses, para así poder tener un consumo mejor estimado.

$$E_d = \frac{\sum E_{meses}}{n \cdot 30\ dias} \quad (7)$$

E_{meses}: Es la suma de la energía consumida de la cantidad de meses a analizar kWh/mes.

n: El número de meses analizados.

$$E_d = \frac{1.507{,}77\ kWh/mes}{12\ meses \cdot 30\ dias} = \frac{1.507{,}77\ kWh}{360\ dias} = 4{,}188\ kWh/dia$$

6.3.2. Dimensionamiento generador fotovoltaico. Con este dato se puede determinar una cantidad de energía que iguale o se acerque al consumo diario, donde f_s se integran los coeficientes de pérdidas (suciedad, temperatura, eficiencia del inversor y cableado), para esto se utiliza una variante de la Ecuación 2 con un f_s de 0.8.

$$P_{wp} = \frac{E_d}{HSP \cdot f_s} \quad (8)$$

$$P_{wp} = \frac{4{,}188 kWh/dia}{4{,}5 \cdot 0{,}8} = \frac{4{,}188 kWh/dia}{3{,}6} = 1{,}163\ kWp$$

Para la selección de paneles se tomará nuevamente el criterio de potencia máxima la cual será de 455Wp y se hará con la ecuación 3.

$$N_p = \frac{1.163Wp}{455Wp} = 2.56\ \approx 4\ paneles$$

6.3.3. Dimensionamiento de inversor. En sistemas interconectados, se busca una relación especifica entre la potencia de los paneles (DC) y la potencia del inversor (AC). Debido a que rara vez los paneles entregan su potencia pico debido al calor y la inclinación. A esta relación se le conoce como DC/AC Ratio. Para el caso de estudio se utilizará un Ratio de 1,2 siendo un estándar muy seguro.

$$P_{inv} = \frac{P_{dc}}{Ratio} \qquad (9)$$

P_{dc}: Sumatoria de potencia de los paneles.

$Ratio$: Relación de potencias (va desde 1,1 a 1,25).

$$P_{inv} = \frac{1.820\ Wp}{1{,}2} = 1.517\ Wp$$

Con el valor de 1.517 Wp se busca un inversor en el mercado que este cerca de ese valor donde lo más recomendable es que este por encima, por tanto, uno de 2.000 Wp sería el indicado, gracias a su relación más cercana al Ratio.

$$\text{Ratio} = \frac{P_{dc}}{P_{inv}} = \frac{1.820\ \text{Wp}}{2000\ \text{Wp}} = 0{,}9$$

6.3.4. Costo económico de sistema (On-Grid). En la Tabla 5 se detalla el desglose de los costos directos asociados a los componentes principales de la configuración interconectada a la red. Este presupuesto se centra en los activos tecnológicos esenciales, excluyendo de manera

deliberada la infraestructura de soporte, los materiales de instalación eléctrica y los costos de mano de obra.

Tabla 6.
Costos componentes On-Grid.

Ítems	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Total
1	Panel solar 455Wp Monocristalino	4	$ 594.693,00	$ 2.378.772
4	Inversor 2 kW	1	$ 1.793.280,00	$ 1.793.280,00
			Total	$ 4.172.052,00

Fuente: Construcción propia con datos de https://shre.ink/Lq2D

6.4. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico (Híbrido)

El sistema hibrido es el más completo y versátil, debido a que combina las ventajas operativas de la autonomía y el ahorro energético: la seguridad de las baterías (Off-Grid) con la flexibilidad y ahorro de estar conectado a la red (On-Grid). Teniendo este como premisa el autoconsumo y el respaldo, gestionando de manera inteligente entre los paneles, las baterías y la red eléctrica.

6.4.1. Cálculo del generador fotovoltaico (Paneles). El objetivo es generar los 4.518 Wh/día con energía solar para maximizar el ahorro para hallar este se tomó como referencia la Ecuación 8.

$$P_{wp} = \frac{E_d}{HSP \cdot f_s} = \frac{4.518\,Wh/dia}{4.5h \cdot 0{,}8} = \frac{4.518\,W/dia}{3{,}6} = 1.255\,Wp$$

Cantidad de paneles: Para este se utiliza la Ecuación 3.

$$N_p = \frac{P_{wp}}{P_{panel}} = \frac{1.255\ \text{Wp}}{455\ \text{Wp}} = 2.75\ \approx 4\ Paneles$$

6.4.2. Dimensionamiento del banco de baterías (respaldo). En un sistema híbrido, no se considera viable técnica ni económicamente respaldar el 100% de la carga. Se opta por una configuración de cargas criticas para optimizar la relación costo-beneficio del banco de baterías.

$$P_{cr} = \sum P_{resp} \qquad (10)$$

P_{cr}: Potencia critica.

P_{resp}: Potencia de respaldo (cargas críticas a respaldar).

Cargas críticas de la portería: Cámara de Seguridad (50 W) e Iluminación LED (84 W).

$$P_{cr} = 50\ W + 84\ W = 134\ W$$

La energía de respaldo requerida para el sistema será:

$$E_r = P_{cr} \cdot h_{dia} \qquad (11)$$

h_{dia}: Cantidad de horas por día.

Tiempo de autonomía deseado: Se asume 1 día (24 horas) de respaldo continuo suficiente para cubrir el tiempo promedio estimado de días sin energía eléctrica.

$$E_r = 134\text{W} \cdot 24\text{ h} = 3.216\text{ Wh}$$

Cálculo de baterías (Tecnología Litio LiFePO4 - 48V): Se elige un sistema a 48V 100Ah para mayor eficiencia y menor grosor de cables con una profundidad de Descarga (DoD) Litio: 80% (0.8).

$$C_n = \frac{E_r}{V_{sys} \cdot DoD \cdot \eta_{inv}} \qquad (12)$$

η_{inv}: Eficiencia del inversor.

$$C_n = \frac{3.216\,Wh}{48\text{ V} \cdot 0.8 \cdot 0.9} = \frac{3.216\,Wh}{34.56\text{ V}} = 93{,}06\,Ah$$

6.4.3. Selección del inversor híbrido. El inversor debe gestionar la entrada solar de los 4 paneles de 455 Wp (1.820 Wp), la red de EPM, las baterías y la carga simultanea (ver Tabla 2).

Debido a la necesidad de tener una autonomía de 1 día y que la cantidad de corriente necesaria para cargarla es de 93,06 Ah es necesario implementar un inversor de 6 kW (ver Figura 13). Así se estaría cumpliendo con las condiciones necesarias tanto de la carga de los paneles y la simultánea, dejando espacio a una expansión de ser necesario.



Figura 13. inversor hibrido de 6kW a 48V.
Fuente: https://shre.ink/Lq20

6.4.4. Costo económico de sistema (Hibrido). En la Tabla 6 se presenta el desglose de los costos directos asociados a los componentes principales de la solución híbrida propuesta. Al igual que en los análisis previos, este presupuesto se enfoca exclusivamente en los activos tecnológicos de generación, almacenamiento y gestión de potencia, sin incluir los costos derivados de la estructura de montaje, el cableado de interconexión ni la ejecución del proyecto.

Tabla 7.
Costos componentes híbridos.

Ítems	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Total
1	Panel solar 455Wp Monocristalino	4	$ 594.693,00	$ 2.378.772,00
2	Batería 48V 100Ah Litio	1	$ 4.276.563,00	$ 4.276.563,00
4	Inversor 48V 6kW	1	$ 1.929.600,00	$ 1.929.600,00
			Total	$ 8.584.935,00

Fuente: Construcción propia con datos de https://shre.ink/Lq2D

6.5. Análisis financiero y viabilidad del proyecto

Para determinar la factibilidad económica de la implementación del sistema fotovoltaico, se realiza una proyección de costos, ahorros e indicadores de retorno de inversión mediante la aplicación de la metodología de análisis costo-beneficio. Este enforque determina los ahorros generados por el sistema fotovoltaico a lo largo de su vida útil (estimada en 25 años) compensando la inversión inicial y los costos operativos.

6.5.1. Supuestos y parámetros financieros estimados.

- **Tarifa de energía (EPM):** Se estima un costo promedio de $880 COP por kilovatio-hora (kWh), considerando una tarifa comercial en la región para abril de 2026.
- **Incremento anual de tarifa:** Se proyecta un aumento conservador del 5% anual en el costo de la energía, debido a la inflación y las tendencias del sector energético en Colombia.
- **Costo de mantenimiento anual:** Se estima un costo de $150.000 COP anuales para la limpieza de paneles y revisión del sistema.

Producción anual de energía: La determinación de la energía anual requiere el cálculo de la producción solar específica para cada configuración propuesta y esto se realiza con la Ecuación 13. En la Tabla 7 se presenta la estimación de la producción energética anual para cada una de las configuraciones evaluadas.

$$E = P_{inst} \cdot HSP \cdot PR \cdot 365\ dias \qquad (13)$$

P_{inst}: Potencia instalada del sistema (Paneles).

PR: Factor de pérdidas de cada sistema.

Tabla 8.
Producción anual de cada sistema.

Ítems	Descripción	PR típico	Producción anual (kWh/año)
1	Sistema Off-Grid	0,65	1943,1
2	Sistema On- Grid	0,8	2391,5
3	Sistema Hibrido	0,75	2242,0

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que cualquiera de las configuraciones propuestas satisface plenamente el consumo requerido de ~1.507,77 kWh/año de consumo de la portería.

6.5.2. Análisis de costos e inversión inicial. A continuación, se detalla la inversión inicial estimada para la ejecución del proyecto por cada sistema propuesto (ver Tablas 8, 9 y 10).

Tabla 9.
Presupuesto detallado de inversión inicial sistema Off-Grid.

Ítems	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo total
1	Equipos y componentes principales del sistema Off-Grid	1	Und	$ 17.790.380,00	$ 17.790.380,00
2	Estructura para montaje paneles	1	Und	$ 400.000,00	$ 400.000,00
3	Cableado Solar, Protecciones DC/AC y Conectores	1	Kit	$ 1.000.000,00	$ 1.000.000,00
4	Mano de obra, servicios de instalación y puesta en operación	1	Servicio	$ 1.500.000,00	$ 1.500.000,00
				Total	$ 20.690.380,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.
Presupuesto detallado de inversión inicial sistema On-Grid.

Ítems	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo total
1	Equipos y componentes principales del sistema On-Grid	1	Und	$ 4.172.052,00	$ 4.172.052,00
2	Estructura para montaje paneles	1	Und	$ 400.000,00	$ 400.000,00
3	Cableado Solar, Protecciones DC/AC y Conectores	1	Kit	$ 1.000.000,00	$ 1.000.000,00
4	Mano de obra, servicios de instalación y puesta en operación	1	Servicio	$ 1.500.000,00	$ 1.500.000,00
				Total	$ 7.072.052,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.
Presupuesto detallado de inversión inicial sistema híbrido.

Ítems	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo total
1	Equipos y componentes principales del sistema hibrido	1	Und	$ 8.584.935,00	$ 8.584.935,00
2	Estructura para montaje paneles	1	Und	$ 400.000,00	$ 400.000,00
3	Cableado Solar, Protecciones DC/AC y Conectores	1	Kit	$ 1.000.000,00	$ 1.000.000,00
4	Mano de obra, servicios de instalación y puesta en operación	1	Servicio	$ 1.500.000,00	$ 1.500.000,00
				Total	$ 11.484.935,00

Fuente: Elaboración propia.

6.5.3. Proyección de ahorro y viabilidad económica. El ahorro económico se determina a partir de la energía desplazada de la red eléctrica convencional, la cual asciende a 1.507,77 kWh/año para todas las alternativas. Asimismo, se integra el beneficio económico derivado de la exportación de excedentes para los sistemas On-Grid e híbrido, conforme a la tarifa de $880 COP/kWh (ver Tabla 11).

Para las configuraciones con interacción con la red, se procede al cálculo del ahorro anual promedio mediante la cuantificación de la energía inyectada.

$$E_{exc} = E_{pro} - E_{con} \qquad (14)$$

E_{exc}: Energía excedente.

E_{con}: Energía consumida (1.507,77 kWh/año).

E_{pro}: Energía producida por cada sistema.

Para un el sistema On-Grid seria:

$$E_{exc} = 2.391{,}5 - \ 1.507{,}77 = 883{,}73\ kWh/año$$

Para un el sistema hibrido seria:

$$E_{exc} = 2.242{,}00 - \ 1.507{,}77 = 734{,}23\ kWh/año$$

Tabla 12.
Ahorro anual promedio por sistema.

Ítems	Descripción	Sistema Off-Grid	Sistema On-Grid	Sistema Hibrido
1	Consumo anual evitado (kWh/año)	1507,77	1507,77	1507,77
2	Ahorro anual bruto (COP)	$ 1.326.837,60	$ 1.771.227,60	$ 1.696.050,60
3	Ahorro anual neto (COP)	$ 1.176.837,60	$ 1.621.227,60	$ 1.546.050,60

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el marco normativo de la Resolución CREG 030 de 2018, los excedentes de generación pueden ser compensados por el operador de red, siendo este un costo normalmente de $300 a $500 kWh (depende del operador de red). Para efectos del análisis financiero, se

establece un valor de compensación de $400 COP/kWh, con una proyección de incremento anual del 5 % (ver Tablas 12, 13 y 14).

Tabla 13.
Proyección de ahorros y flujo de caja sistema Off-Grid.

Año	Ahorro neto Anual	Flujo de caja Acumulado
0		$ (20.690.380,00)
1	$ 1.176.837,60	$ (19.513.542,40)
2	$ 1.235.679,48	$ (18.277.862,92)
3	$ 1.297.463,45	$ (16.980.399,47)
4	$ 1.362.336,63	$ (15.618.062,84)
5	$ 1.430.453,46	$ (14.187.609,38)
6	$ 1.501.976,13	$ (12.685.633,25)
7	$ 1.577.074,94	$ (11.108.558,31)
8	$ 1.655.928,68	$ (9.452.629,63)
9	$ 1.738.725,12	$ (7.713.904,51)
10	$ 1.825.661,37	$ (5.888.243,14)
11	$ 1.916.944,44	$ (3.971.298,69)
12	$ 2.012.791,67	$ (1.958.507,03)
13	$ 2.113.431,25	$ 154.924,22

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14.
Proyección de ahorros y flujo de caja sistema On-Grid.

Año	Ahorro neto Anual	Flujo de caja Acumulado
0		$ (7.072.052,00)
1	$ 1.621.227,60	$ (5.450.824,40)
2	$ 1.702.288,98	$ (3.748.535,42)
3	$ 1.787.403,43	$ (1.961.131,99)
4	$ 1.876.773,60	$ (84.358,39)
5	$ 1.970.612,28	$ 1.886.253,89

Fuente: Autor.

Tabla 15.
Proyección de ahorros y flujo de caja sistema hibrido.

Año	Ahorro neto Anual	Flujo de caja Acumulado
0		$ (11.484.935,00)
1	$ 1.546.050,60	$ (9.938.884,40)
2	$ 1.623.353,13	$ (8.315.531,27)
3	$ 1.704.520,79	$ (6.611.010,48)
4	$ 1.789.746,83	$ (4.821.263,66)
5	$ 1.879.234,17	$ (2.942.029,49)
6	$ 1.973.195,88	$ (968.833,62)
7	$ 2.071.855,67	$ 1.103.022,05

Fuente: Elaboración propia.

6.5.4. Indicadores de viabilidad financiera. El Periodo de retorno de la inversión (*Payback* Simple) y retorno de la inversión (ROI). Dichos indicadores resultan fundamentales para determinar la viabilidad financiera y la sostenibilidad del proyecto en el tiempo. También el valor actual neto (VAN) y la tasa de rentabilidad del proyecto (TIR), para lo cual se estableció una tasa de descuento del 10 %.

$$P_{ri} = \text{n} + \frac{|F_n|}{F_{n+1}} \qquad (15)$$

P_{ri}: Periodo de recuperación de la inversión.

n: Ultimo año con flujo acumulado negativo.

F_n: Flujo acumulado negativo en ese año.

F_{n+1}: Ahorro del año siguiente.

$$ROI = \frac{Ahorro\ neto\ anual}{Inversión\ total} * 100 \qquad (16)$$

$$VAN = \sum \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0 \qquad (17)$$

F_t: Flujo de caja en el año t.

r: tasa de descuento.

I_0: Inversión inicial.

$$TIR = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t}{(1+r)^t} \qquad (18)$$

n: Vida útil del proyecto (25 años).

Cabe precisar que la TIR se calcula mediante métodos iterativos, dado que su estructura matemática no permite una solución analítica directa, razón por la cual se emplean herramientas computacionales para su obtención (ver Tabla 15).

Tabla 16.
Indicadores financieros.

Ítem	Descripción	Payback (años)	ROI (%)	VAN	TIR
1	Off-Grid	12,07	9,47	-$ 4.509.969,45	2%
2	On-Grid	4,96	1,19	$ 15.218.303,24	27%
3	Hibrido	6,53	8,44	$ 9.771.807,17	16%

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de indicadores financieros de la Tabla 15, se puede que la configuración Off-Grid es inviable económicamente dado que su VAN es negativo y su TIR es inferior a la tasa de descuento. Y aunque los indicadores del sistema On-Grid son buenos, la propuesta es

técnicamente limitada para los requerimientos del proyecto. Su dependencia total de la red eléctrica convencional impide suministrar energía durante las fallas de red, comprometiendo la autonomía de los sistemas de seguridad críticos ante contingencias en la red eléctrica. En conclusión, el sistema híbrido se consolida como la alternativa óptima, al integrar una rentabilidad competitiva con la resiliencia operativa necesaria. Esta alternativa equilibra una rentabilidad financiera aceptable con la seguridad operativa, ya que el banco de baterías garantiza la continuidad de las cargas críticas ante interrupciones del fluido eléctrico, cumpliendo así con los objetivos de resiliencia y sostenibilidad planteados para el campamento EPM.

6.6. Análisis con cargas adicionales

Con el objetivo de evaluar una posible expansión en el sistema se propone la integración de cargas adicionales en el sistema híbrido, comparando la cantidad de carga total como la necesaria por corriente de arranque. Para esto se tendrá como base la Tabla 2 y se representa en la Tabla 16.

6.6.1. Componentes adicionales. Estos componentes serán 2 motores de 185W cada uno (ver Figura 14) y un modem wifi de 7,5W (ver Figura 15).



Figura 14. Motores de puertas batientes con sistema de control inalámbrico.
Fuente: https://goo.su/GzEtUX



Figura 15. Modem Wifi.
Fuente: https://goo.su/bDn4yaU

Tabla 17.
Cuadro de cargas y consumo energético diario con componentes adicionales.

Ítem	Equipo	Cantidad	Potencia Unit. (W)	Potencia total (W)	Horas de uso/Dia	Energía diaria (Wh/día)
1	Iluminación Led	7	12	84	12	1.008
2	Ofimática	1	200	200	10	2.000
3	Sistema de comunicación	1	12	12	6	72
4	Sistema de seguridad	1	50	50	24	1.200
5	Dispensador de agua	1	660	660	0,36	238
6	Motores puertas	2	185	370	0,17*	62,9
7	Modem Wifi	1	7,5	7,5	24	180
Total				**1.384**		**4.761**

Fuente: Elaboración propia.
Nota: Para los motores se estimó un total de tiempo de apertura y cierre de 43,75 segundos aproximadamente y con un total en promedio de 15 aperturas por día se calculó el tiempo de uso.

6.6.2. Estimación de demanda energética y componentes del sistema solar. Para hallar la demanda requerida, junto a los componentes se utilizaron las Ecuaciones 1, 2, 3, 10, 11 y 12, que se ve reflejado en la Tabla 17.

6.6.3. Selección de inversor híbrido. Debido a la necesidad de tener una autonomía de 12 horas y que la cantidad de corriente necesaria para cargarla es de 178Ah es necesario implementar un inversor de 10kW (ver Figura 16). Así se estaría cumpliendo con las condiciones necesarias de la carga.

Tabla 18.
Resultados de dimensionamiento con cargas adicionales.

Ítem	Descripción	Valor	Unidad
1	E_d	4.761	W
2	E_{real}	5951	W
3	P_{wp}	1469	Wp
4	N_p	4	Paneles
5	P_{cr}	511,5	W
6	E_r	6138	Wh
7	C_n *	178	Ah

Fuente: Elaboración propia.
Nota: Para la cantidad de corriente necesaria se consideró una autonomía de 12 horas, por tanto, la cantidad de baterías serán de 2 de 100Ah en serie.



Figura 16. Inversor híbrido de 10kW a 48V.
Fuente: https://goo.su/XWTin

6.6.4. Costo económico sistema hibrido con nuevas cargas. En la Tabla 18 se presenta el desglose de los costos directos asociados a los componentes principales de la solución híbrida propuesta. Al igual que en los análisis previos, este presupuesto se enfoca exclusivamente en los activos tecnológicos de generación, almacenamiento y gestión de potencia, sin incluir los costos derivados de la estructura de montaje, el cableado de interconexión ni la ejecución del proyecto.

Tabla 19.
Costos componentes híbridos.

Ítems	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Total
1	Panel solar 455Wp Monocristalino	4	$ 594.693,00	$ 2.378.772,00
2	Batería 48V 100Ah Litio	1	$ 4.276.563,00	$ 4.276.563,00
4	Inversor 48V 10kW	1	$ 6.010.000,00	$ 6.010.000,00
			Total	$ 12.665.335,00

Fuente: Construcción propia con datos de https://shre.ink/Lq2D

6.6.5. Análisis financiero. Para realizar todo el componente económico se contempla la adición del total de la Tabla 18 más los componentes de cableado solar, protecciones DC/AC, conectores y mano de obra, servicios de instalación y puesta en operación. Adicional a esto se tendrá como referente las Tablas 7, 11 y la Ecuación 14. Los resultados se verán reflejados en la Tabla 19.

Tabla 20.
Indicadores financieros sistema híbrido.

Ítem	Descripción	Valor	Unidad
1	Presupuesto detallado de inversión inicial sistema híbrido.	$ 12.665.335,00	$(COP)
2	Energía excedente	734,23	kWh/Año

Fuente: Elaboración propia.

Indicadores de viabilidad financiera. Para este apartado se consideran los criterios establecidos en la sección 6.5.4 para esta opción con una adicional de carga donde los resultados se verán en la Tabla 20 y se compara con el sistema híbrido sin las cargas adicionales.

Tabla 21.
Comparación sistema híbrido sin cargas adicionales y con cargas adicionales.

Ítem	Descripción	Payback (años)	ROI (%)	VAN	TIR
1	Hibrido	6,53	8,44	$ 9.771.807,17	16%
2	Hibrido + Cargas	9,35	24,73	$ 7.286.100,17	13%

Fuente: Elaboración propia.

De la comparación de la Tabla 20 se observa que la inclusión de las cargas adicionales extiende el periodo de recuperación de la inversión (*Payback*) de 6,58 a 8,69 años, pero el proyecto conserva su viabilidad económica. Los indicadores demuestran que el sistema híbrido propuesto es financieramente sostenible y técnicamente escalable ante futuras necesidades de consumo.

7. Conclusiones

A partir de la caracterización de cargas, se determinó un consumo promedio de 4,19 kWh/día basado en los históricos de EPM y la estimación de uso de los equipos de la portería. Este diagnóstico permitió evaluar tres configuraciones tecnológicas para identificar la solución con mayor viabilidad técnica y económica.

Respecto al dimensionamiento, se estableció que la configuración óptima para las tres alternativas requiere una potencia instalada de 1.820 Wp, compuesta por cuatro paneles monocristalinos de 455 Wp. La conexión de estos módulos en serie permite optimizar el voltaje de entrada al regulador, optimizando el calibre de los conductores y mitigando las pérdidas técnicas por efecto Joule. En cuanto al almacenamiento, se estandarizó el uso de tecnología de Litio (LiFePO4) de 100Ah a 48V, dada su mayor profundidad de descarga y vida útil en comparación con las tecnologías convencionales.

El análisis financiero reveló diferencias críticas entre los sistemas:

La configuración Off-Grid se desestimó, dado que los indicadores financieros (VAN negativo y TIR inferior a la tasa de descuento) confirman su inviabilidad económica.

A pesar de su eficiencia financiera, el sistema On-Grid se consideró técnicamente limitado para los requerimientos del proyecto. Su dependencia total de la red eléctrica convencional

impide suministrar energía durante las fallas de red, comprometiendo la autonomía de los sistemas de seguridad críticos ante contingencias en la red eléctrica.

En conclusión, el sistema híbrido se consolida como la alternativa óptima, al integrar una rentabilidad competitiva con la resiliencia operativa necesaria. Esta alternativa equilibra una rentabilidad financiera aceptable con la seguridad operativa, ya que el banco de baterías garantiza la continuidad de las cargas críticas ante interrupciones del fluido eléctrico, cumpliendo así con los objetivos de resiliencia y sostenibilidad planteados para el campamento EPM.

A partir de los resultados en el análisis de cargas adicionales, se concluye que la integración de nuevos componentes —motores de puertas y sistemas de conectividad— incrementa la demanda energética diaria a un total de 4.761 Wh/día. Técnicamente, esta expansión requiere una reconfiguración del sistema mediante la implementación de un inversor híbrido de 10 kW, lo cual garantiza la operatividad y autonomía de 12 horas solicitada para los activos tecnológicos.

Desde la perspectiva financiera, la comparación detallada permite determinar que, si bien la inclusión de estas cargas adicionales extiende el periodo de recuperación de la inversión (Payback) de 6,58 a 8,69 años, el proyecto conserva su viabilidad económica. Lo anterior se sustenta en un VAN positivo de $ 5.181.666,17 y una TIR del 11%, indicadores que demuestran que el sistema híbrido propuesto es financieramente sostenible y técnicamente escalable ante futuras necesidades de consumo.

8. Recomendaciones

Plan de mantenimiento preventivo: Se recomienda establecer un programa de limpieza trimestral para los paneles fotovoltaicos, considerando la ubicación del campamento en una zona con presencia de polvo y vegetación. Asimismo, es fundamental realizar un reapriete anual de las conexiones eléctricas con el fin de mitigar la formación de puntos calientes y la degradación térmica de los componentes que degraden la eficiencia del sistema.

Implementación de monitoreo remoto: Dada la compatibilidad del inversor híbrido con protocolos de comunicación, se sugiere su integración a la red de datos institucional, se sugiere integrar el inversor a la red de datos del campamento EPM. Esto permitiría un monitoreo en tiempo real del estado de carga de las baterías de litio y la generación diaria, lo cual optimiza la detección temprana de fallos y reduce los costos operativos por desplazamientos de mantenimiento preventivo. a la portería.

Refuerzo de protecciones contra sobretensiones: Debido a la alta actividad de descargas atmosféricas en la zona de Guadalupe, Antioquia, se recomienda verificar periódicamente el estado de los Dispositivos de Protección contra Sobretensiones (DPS) tanto en el lado de corriente continua (DC) como en el de corriente alterna (AC), garantizando que el sistema de puesta a tierra mantenga los niveles de impedancia exigidos por el RETIE para sistemas de autogeneración.

Gestión de incentivos tributarios: Se sugiere a la administración del campamento iniciar el trámite de certificación ante la UPME para acceder a los beneficios de la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021, tales como la exclusión de IVA en la adquisición de paneles e inversores y la deducción de renta, lo que reduciría significativamente el periodo de retorno de la inversión calculado.

Capacitación del personal operativo: Se recomienda implementar un programa de capacitación para el personal operativo de la portería sobre la gestión eficiente de la demanda energética. de la portería "El Limón" sobre el uso eficiente de la energía. Aunque el sistema es automático, el conocimiento sobre qué cargas son críticas y cómo evitar consumos innecesarios durante periodos prolongados de baja radiación ayudará a prolongar la vida útil del banco de baterías.

Escalabilidad del sistema: En caso de que la demanda energética de la portería aumente por la incorporación de nuevos equipos de vigilancia o aire acondicionado, se recomienda aprovechar la arquitectura modular del inversor híbrido para añadir dos paneles fotovoltaicos en serie, manteniendo la compatibilidad con el diseño original de 48V.

9. Referencias

Boxwell, M. (2017). Solar electricity handbook: A simple, practical guide to solar energy – designing and installing solar photovoltaic systems. Greenstream Publishing.

Celis, J., & Rodríguez, D. (2023). Análisis técnico-económico de sistemas fotovoltaicos on-grid para el sector residencial en Colombia bajo la resolución CREG 174. *Ingeniería y Competitividad*, 25(1), e-211.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2021). *Resolución 174 de 2021: Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional*.

Congreso de la República de Colombia. (2021). *Ley 2099 de 2021: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético y otras disposiciones*. Diario Oficial No. 51.731.

Díaz, P. (2020). Energía solar fotovoltaica: Cálculo de instalaciones. Cano Pina.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes (4.ª ed.). Wiley.

García, A., & López, F. (2023). Financial feasibility of hybrid renewable energy systems in the Colombian residential sector. *Energy Reports*, 9, 345-358. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.015

Giraldo, S., & Henao, C. (2022). Diseño óptimo de sistemas fotovoltaicos aislados para zonas rurales de Antioquia considerando incertidumbre climática. *TecnoLógicas*, 25(53), e2167.

Harper, G. (2013). Solar energy projects for the evil genius. McGraw-Hill Education.

Huggins, R. A. (2016). *Energy Storage: Fundamentals, Materials and Applications* (2nd ed.). Springer.

ICONTEC. (2020). *NTC 2050: Código Eléctrico Colombiano* (Actualización y anexos recientes). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

IDEAM, & UPME. (2023). *Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia*. Unidad de Planeación Minero Energética.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Kalogirou, S. A. (2014). Solar energy engineering: Processes and systems (2.ª ed.). Academic Press.

Li, W., Long, R., Chen, Z., & Geng, S. (2022). Techno-economic analysis of a hybrid photovoltaic/lithium battery system for remote base stations. *Journal of Energy Storage*, 52, 104780.

Linden, D., & Reddy, T. B. (Eds.). (2011). Handbook of batteries (4.ª ed.). McGraw-Hill.

Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). Photovoltaic systems engineering (3.ª ed.). CRC Press.

Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Actualización del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE*.

Naciones Unidas. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future. Oxford University Press.

Perpiñán, O. (2020). Energía solar fotovoltaica. Creative Commons.

Villada, F., Cadavid, D., & Molina, J. (2021). Impacto de la temperatura en el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en climas tropicales de montaña. *Información Tecnológica*, 32(4), 115-124.

Zhang, Y., Ma, T., & Yang, H. (2021). Optimization of hybrid photovoltaic/battery systems for critical loads in grid-connected buildings. *Applied Energy*, 285, 116430.