

SOLARCOM - Proyecciones en sostenibilidad del uso de energía fotovoltaica a escala comunitaria en Colombia



SOLARCOM - Projections on Sustainability of Community-Scale Photovoltaic Energy Use in Colombia



PROYECCIONES EN SOSTENIBILIDAD DEL USO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA A ESCALA COMUNITARIA EN COLOMBIA

Esta publicación fue realizada por la Corporación Cambio Sostenible¹ y la UNIR²

¹Cambio Sostenible es una entidad sin ánimo de lucro. constituida en el año 2020, cuya misión es promover el desarrollo sostenible para la equidad social.

²La Universidad Internacional de la Rioja (UNIR) es una institución europea de referencia en el ámbito de la Educación Superior de Colombia.



Editado por Kenny Stiven Espinoza

Trabajo de prácticas presentado por Luisa Fernanda Torres Blanco

Máster Universitario en Gestión del Desarrollo Sostenible - UNIR

Revisión de estilo Angie Paola E. Velásquez

Julio, 2025



Esta obra está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 Internacional

[CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Proyecciones en sostenibilidad del uso de energía fotovoltaica a escala comunitaria en Colombia.

Projections on Sustainability of Community-Scale Photovoltaic Energy Use in Colombia

Luisa Fernanda Torres Blanco¹, Angie Paola Espinoza²

¹Ingeniera electricista, practicante del Máster Universitario en Gestión del Desarrollo Sostenible

²Ingeniera ambiental, investigadora, Tutora de prácticas cambiosostenible@cambiosostenible.org

Resumen

Colombia enfrenta un desafío estructural en la consolidación de un sistema energético que sea sostenible, equitativo y accesible para toda su población, especialmente en las zonas no interconectadas (ZNI), donde más de 1.8 millones de personas carecen de acceso a energía eléctrica (Green, 2001). El presente estudio tiene como objetivo realizar un diagnóstico integral del uso de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia, evaluando su viabilidad técnica, impacto social, rentabilidad económica y huella ambiental. Para ello, se analizan casos representativos de sistemas on-grid, off-grid e híbridos, integrando indicadores técnicos y ambientales, estudios de impacto sobre biodiversidad y suelo, así como análisis financieros detallados (LCOE y TIR). Los proyectos grandes tienen mayor eficiencia económica por sus menores costos unitarios de generación. Los proyectos en zonas no interconectadas tienen mayores costos por unidad, pero cumplen un papel social clave, llevando energía a comunidades vulnerables. Los resultados financieros muestran que la rentabilidad depende del tamaño, la ubicación y la tecnología. Se concluye que el análisis de casos demuestra la factibilidad técnica y financiera de estos proyectos en Zonas No Interconectadas, con tiempos de retorno aceptables y requiere de esfuerzo institucional para superar barreras estructurales.

Palabras clave: Energía Renovable, Zonas No Interconectadas, Fotovoltaico, Sostenibilidad

Abstract

Colombia faces a structural challenge in building an energy system that is sustainable, equitable, and accessible to all—particularly in non-interconnected zones (ZNI), where more than 1.8 million people remain without electricity (Green, 2001). This study provides a comprehensive assessment of photovoltaic solar systems in Colombia, examining their technical feasibility, social impact, economic viability, and environmental footprint. Representative cases of on-grid, off-grid, and hybrid systems are analyzed through technical and environmental indicators, biodiversity and land-use assessments, and detailed financial models (LCOE and IRR). Large-scale projects demonstrate higher economic efficiency due to lower unit generation costs, while systems in non-interconnected zones, though costlier per unit, play a crucial social role by supplying electricity to vulnerable communities. Financial outcomes reveal that profitability is strongly influenced by project size, location, and technology. The findings confirm the technical and financial feasibility of photovoltaic deployment in non-interconnected areas, with acceptable payback periods, while underscoring the importance of institutional efforts to address persistent structural barriers.

Keywords: Renewable Energy, Non-Interconnected Zones, Photovoltaics, Sustainability

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	8
LISTA DE SIGLAS	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. METODOLOGÍA	12
2.1 ENFOQUE METODOLÓGICO.....	12
2.2 ETAPAS METODOLÓGICAS DIAGNÓSTICO INVESTIGATIVO Y MAPEO DE INICIATIVAS.....	12
2.3 ETAPAS METODOLÓGICAS EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD CON INDICADORES TÉCNICOS Y AMBIENTALES	13
3. CONTEXTO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA	15
3.1 SITUACIÓN ACTUAL EN LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI)...	15
3.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA.....	16
3.3 ÁRBOL DE PROBLEMAS Y OBJETIVOS	16
4. CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA	19
4.1 FUNDAMENTO TEORICOS	19
5. IMPACTO DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN ZONAS RURALES Y ZNI EN COLOMBIA.....	23
5.1 ECONÓMICO	23
5.2 SOCIAL	23
5.3 AMBIENTAL	23
6. CONTEXTO ACTUAL DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA	23
6.1 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS LA RED	24
6.2 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS AISLADOS (OFF GRID).....	27
7. INDICES DE REPLICABILIDAD	28
8. HERRAMIENTAS Y MÉTRICAS DE MEDICIÓN.....	30
8.1 MÉTRICAS TÉCNICAS Y AMBIENTALES DE MEDICIÓN	30
8.2 HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN.....	31
9. INDICADORES TÉCNICOS Y AMBIENTALES.....	32
10. EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS	34

11.	IMPACTO AMBIENTAL EN BIODIVERSIDAD Y SUELO DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA.....	36
11.1	EJEMPLOS DE ESTUDIOS AMBIENTALES EN PROYECTOS SOLARES EN COLOMBIA.....	36
11.2	IMPACTO AMBIENTAL EN BIODIVERSIDAD Y SUELO EN LOS PROYECTOS SFV DE ESTUDIO	37
12.	ANÁLISIS FINANCIERO	43
12.1	COSTO NIVELADO DE LA ENERGÍA	43
12.2	TASA INTERNA DE RETORNO FINANCIERA (TIR).....	46
12.3	OPORTUNIDADES Y BARRERAS ECONÓMICAS Y POLÍTICAS	48
13.	PROPUESTA DE POLÍTICAS DE MEJORA PARA LAS COMUNIDADES RURALES Y NO INTERCONECTADAS.....	50
	CONCLUSIONES.....	51
	RECOMENDACIONES	52

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Matriz energética de Colombia.....	15
Imagen 2. Situación actual zonas no interconectadas.....	15
Imagen 3. Árbol de problemas	17
Imagen 4. Árbol de objetivos	18
Imagen 5. Ejemplo sistema solar fotovoltaico aislado	19
Imagen 6. Esquema de bloques clasificación sistemas solares fotovoltaicos.....	22
Imagen 7. Esquema tipos de sistemas solares fotovoltaicos	22
Imagen 8. Ubicación sistema SFVaislado Bocas del Atrato	38
Imagen 9. Ubicación Granja solar bosque solar los llanos.....	39
Imagen 10. Ubicación Sistema híbrido solar-diésel Isla de Providencia	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica clasificación de los SFV conectado a la red.....	24
Figura 2. Gráfica cantidad de SFV conectados a la red instalados por departamento	25
Figura 3. Gráfica estado del recurso de los SFV	25
Figura 4. Gráfica diez agentes representantes en el sector energético en Colombia.....	26
Figura 5. Gráfica capacidad instalada en diez departamentos	26
Figura 6. Gráfica capacidad instalada por departamento SFV aislado.....	27

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Glosario	8
Tabla 2. Siglas	10
Tabla 3. Tipos sistemas solares fotovoltaicos	20
Tabla 4. Parámetros del sistema fotovoltaico típico.....	22
Tabla 5. Proyectos ejemplo para replicabilidad.....	28
Tabla 6. Indicadores de replicabilidad.....	28
Tabla 7. Métricas técnicas y ambientales de medición	30
Tabla 8. Normas ISO para la medición	31
Tabla 9. Indicadores técnicos y ambientales	32
Tabla 10. Evaluación de la huella de carbono en sistemas solares fotovoltaicos.....	34
Tabla 11. Resultados cálculo huella de carbono.....	35
Tabla 12. Resumen LCOE proyectos SFV en estudio	46
Tabla 13. Flujo neto en un intervalo de tiempo.....	46
Tabla 14. Flujo neto en un intervalo de tiempo.....	47
Tabla 15. Flujo neto en un intervalo de tiempo.....	47
Tabla 16. Resumen resultados TIR sistemas solares fotovoltaicos	47
Tabla 17. Oportunidades y barreras económicas y políticas	48
Tabla 18. Clasificación de los SFV conectado a la red	58
Tabla 19. Cantidad de SFV conectados a la red instalados por departamento	58
Tabla 20. Estado del recurso de los SFV	58
Tabla 21. Diez agentes representantes en el sector energético en Colombia	59
Tabla 22. Capacidad instalada en diez departamentos	59
Tabla 23. Capacidad instalada por departamento SFV aislado	59
Tabla 24. Parámetros generales SFV On Grid	60
Tabla 25. Límites operacionales SFV On Grid	60
Tabla 26. Línea base de emisiones SFV On Grid	61
Tabla 27. Emisiones SFV On Grid.....	61
Tabla 28. Reducciones netas de emisiones SFV On Grid	61
Tabla 29. Límites operacionales SFV Off Grid.....	62
Tabla 30. Emisiones SFV Off Grid	62
Tabla 31. Reducciones netas de emisiones SFV Off Grid	63
Tabla 32. Límites operacionales SFV Híbrido	63
Tabla 33. Emisiones SFV Híbrido.....	64
Tabla 34. Reducciones netas de emisiones SFV Híbrido	64

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Datos sistemas solares fotovoltaicos en Colombia.....	58
ANEXO 2. Procedimiento para el cálculo de la huella de carbono	60

GLOSARIO

Tabla 1. Glosario

TÉRMINO	DEFINICIÓN
AGPE	Sigla de Autogenerador a Pequeña Escala. Usuario que genera energía principalmente para su propio consumo, con capacidad menor o igual a 1 MW.
Análisis financiero	Evaluación económica de un proyecto que incluye costos, ingresos, indicadores como TIR y LCOE, y retorno de inversión.
Autoconsumo	Uso directo de la energía generada por un sistema solar, sin que esta sea inyectada a la red eléctrica.
Autogenerador	Persona o entidad que produce energía para su propio uso. Puede estar conectado a la red eléctrica (on-grid) o ser independiente.
Carbon Payback Time	Tiempo necesario para compensar la huella de carbono generada en la fabricación e instalación de un sistema fotovoltaico.
Capacidad instalada	Potencia máxima que puede producir un sistema eléctrico o planta en condiciones óptimas, expresada en kW o MW.
CO ₂ equivalente (CO ₂ eq)	Unidad que permite comparar diferentes gases de efecto invernadero con base en su potencial de calentamiento global.
Cogenerador	Entidad que genera simultáneamente electricidad y calor útil a partir de una sola fuente de energía, generalmente en procesos industriales.
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social de Colombia. Genera documentos guía para políticas públicas.
CONECTADO A RED (On Grid)	Sistema solar fotovoltaico conectado al Sistema Interconectado Nacional, sin almacenamiento en baterías.
Degradación de paneles	Reducción gradual de la eficiencia de los paneles solares con el paso del tiempo.
Efecto fotovoltaico	Fenómeno físico mediante el cual una célula solar convierte la luz solar en electricidad.
Emisiones evitadas	Cantidad de emisiones de GEI que no se liberan al sustituir fuentes fósiles por energía solar.
Energy Payback Time (EPBT)	Tiempo que tarda un sistema en generar la misma energía que se utilizó para su fabricación.
Generador distribuido (GD)	Sistema que genera energía para ser inyectada a la red en niveles de tensión bajos (típicamente local).
Gestión energética	Conjunto de prácticas destinadas a optimizar el uso de la energía, reduciendo costos y emisiones.
Huella de carbono	Total de gases de efecto invernadero emitidos directa o indirectamente por una actividad, producto o servicio.

Indicadores técnicos	Medidas que permiten evaluar el rendimiento físico de los sistemas, como PR, energía generada, eficiencia, etc.
Índices de replicabilidad	Herramientas que permiten determinar si un proyecto puede ser replicado en otros contextos con éxito técnico, económico y social.
Inversor	Dispositivo que transforma la corriente continua generada por los paneles en corriente alterna, apta para uso doméstico o industrial.
ISO 14064-2:2019	Norma internacional que define metodologías para medir y reportar reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel de proyecto.
ISO 50001:2018	Norma que establece los requisitos para establecer, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía.
LCOE (Levelized Cost of Energy)	Indicador económico que mide el costo promedio de producción energética durante la vida útil del sistema.
Microrred	Red eléctrica local, autosuficiente o semi-autónoma, que puede operar conectada o desconectada del SIN.
Off Grid (Sistema aislado)	Sistema solar que opera independientemente del SIN. Utiliza baterías y/o generadores de respaldo.
On Grid (Conectado a red)	Sistema solar que está conectado al Sistema Interconectado Nacional y no necesita baterías.
Panel solar	Dispositivo compuesto por células solares que convierten luz solar en energía eléctrica.
Performance Ratio (PR)	Indicador de eficiencia que compara la producción real de energía con la teórica, expresado como porcentaje.
Potencia nominal	Máxima potencia que puede entregar un sistema bajo condiciones estándar.
Reducción neta de emisiones	Diferencia entre las emisiones evitadas (por energía solar) y las generadas en el ciclo de vida del sistema.
SFV (Sistema Fotovoltaico)	Conjunto de componentes (paneles, inversor, baterías, etc.) que convierten la luz solar en energía eléctrica.
SIN (Sistema Interconectado Nacional)	Red eléctrica nacional que cubre la mayoría del país. Las zonas fuera del SIN se denominan ZNI.
TIR (Tasa Interna de Retorno)	Indicador financiero que representa la rentabilidad de un proyecto. Si es mayor a la tasa de descuento, el proyecto es viable.
Vida útil	Tiempo estimado durante el cual un sistema solar puede operar eficientemente. Suele ser de 20 a 30 años.
ZNI (Zonas No Interconectadas)	Áreas del país que no están conectadas al SIN, ubicadas en regiones remotas, insulares o de difícil acceso.

LISTA DE SIGLAS

Tabla 2. Siglas

SIGLA	SIGNIFICADO
AGPE	Autogenerador a Pequeña Escala
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
ASIC	Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales
CAPEX	Capital Expenditure (Inversión de capital)
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
EPBT	Energy Payback Time
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GD	Generador Distribuido
GHG	Greenhouse Gases (Gases de Efecto Invernadero)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPSE	Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas
ISO	International Organization for Standardization
LCOE	Levelized Cost of Energy (Costo Nivelado de Energía)
MWp	Megavatio pico (unidad de potencia de sistemas solares)
O&M	Operación y Mantenimiento
OPEX	Operational Expenditure (Gasto operativo)
PR	Performance Ratio
RETScreen	Renewable Energy Technologies Screening Software
SFV	Sistema Fotovoltaico
SIN	Sistema Interconectado Nacional
TIR	Tasa Interna de Retorno
UNIR	Universidad Internacional de La Rioja
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
ZNI	Zonas No Interconectadas

1. INTRODUCCIÓN

Colombia enfrenta un desafío estructural en la consolidación de un sistema energético que sea sostenible, equitativo y accesible para toda su población, especialmente en las zonas no interconectadas (ZNI), donde más de 1.8 millones de personas carecen de acceso a energía eléctrica (Green, 2001). En este contexto, la energía solar fotovoltaica (SFV) ha emergido como una solución viable para cerrar esta brecha, gracias a su bajo impacto ambiental y su adaptabilidad a contextos rurales con limitada infraestructura (Luque & Hegedus, 2011).

El presente diagnóstico ofrece un análisis integral sobre el estado actual de los sistemas solares fotovoltaicos en Colombia, incluyendo su clasificación técnica (sistemas on-grid, off-grid e híbridos), su distribución geográfica, los actores involucrados en su desarrollo, y el impacto social, económico y ambiental que generan, especialmente en comunidades rurales y ZNI. También se destacan los retos persistentes como la alta inversión inicial, los vacíos regulatorios, y las dificultades de financiamiento y operación que afectan la sostenibilidad de los proyectos (World Bank, 2018; IRENA, 2020).

Asimismo, se incluye un análisis de casos representativos y un modelo de índices de replicabilidad, que permiten evaluar el potencial de expansión de estas soluciones en otros territorios, reforzando el papel de la energía solar como motor de desarrollo territorial y de equidad energética (Planas, Quintero & Montealegre, 2021; Mousa et al., 2020).

Frente a este panorama, la energía solar fotovoltaica (SFV) se posiciona como una solución estratégica para diversificar la matriz energética del país, reducir emisiones y promover la equidad territorial. Su implementación en contextos rurales y apartados ofrece beneficios significativos: desde el fortalecimiento de servicios básicos como salud y educación, hasta el impulso de economías locales sostenibles.

El presente estudio tiene como objetivo realizar un diagnóstico integral del uso de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia, evaluando su viabilidad técnica, impacto social, rentabilidad económica y huella ambiental. Para ello, se analizan casos representativos de sistemas on-grid, off-grid e híbridos, integrando indicadores técnicos y ambientales, estudios de impacto sobre biodiversidad y suelo, así como análisis financieros detallados (LCOE y TIR). También se propone un conjunto de políticas públicas y recomendaciones orientadas a fortalecer el despliegue de estas tecnologías en comunidades rurales.

Con un enfoque multidimensional y basado en evidencia, esta investigación busca contribuir a la formulación de estrategias de transición energética justa, participativa y regenerativa para Colombia.

2. METODOLOGÍA

2.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

Este proyecto emplea un enfoque **cualitativo-descriptivo** con componentes **cuantitativos**, dado que busca describir el contexto energético del país, caracterizar agentes y estructuras del sector energético, y establecer índices de replicabilidad a partir de tres casos de éxito en el país.

2.2 ETAPAS METODOLÓGICAS DIAGNÓSTICO INVESTIGATIVO Y MAPEO DE INICIATIVAS

Etapa 1: Revisión documental

En esta etapa, primero se enviaron correos a los agentes del sector energético colombiano como lo son UPME, XM, Ministerio de Minas y Energía y operadores de red para tener mayor información sobre los sistemas solares fotovoltaicos que se encuentran actualmente instalados en Colombia; también se envió un correo a las CAR de los municipios pertenecientes a las Zonas no Interconectadas (ZNI) del país para conocer sistemas solares aislados que han sido instalados en estas regiones. Adicional a esto, se realizó una búsqueda de artículos con palabras clave como sistemas solares, Colombia, sostenibilidad energética. Luego de realizar la revisión de 15 artículos se procedió a realizar las siguientes etapas.

Etapa 2: Realización del árbol de problemas y objetivos

Con base en la revisión bibliográfica se realizó el árbol de problemas en el cual el problema central fue la deficiencia en la implementación de un sistema energético sostenible, accesible, diverso y viable. Se encontraron 5 causas centrales y 7 efectos. Luego de esto se realizó el árbol de objetivos teniendo como base el árbol de problemas.

Etapa 3: Análisis del contexto energético en Colombia

Para realizar el análisis del contexto energético en Colombia se tuvo como base los artículos que se encontraron en revisión bibliográfica, se tuvo un enfoque en las zonas no interconectadas del país y se habló sobre la situación actual en estas zonas y la Energía Solar como una alternativa para suplir estos problemas energéticos.

Etapa 4: Fundamentos teóricos

Se realizó una búsqueda de los conceptos básicos de los sistemas solares fotovoltaicos para así dar contexto a la caracterización previa que se realiza. Se muestran los conceptos básicos de los sistemas solares fotovoltaicos, sus componentes y la clasificación de estos por categoría y tipo de generador según la normativa colombiana.

Etapa 5: Caracterización del sector energético

Para la caracterización del sector energético en Colombia se tomo como referencia la información suministrada por XM para realizar el análisis relacionado con los sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red registrados ante el ASIC (Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales). Por otro lado, los sistemas solares fotovoltaicos que se encontraron fueron en un artículo del ministerio de Ambiente en el cual se muestran algunos de los más importante que se encuentran en operación actualmente en el país. Con la ayuda de Excel se realizó un análisis de los datos suministrados y se elaboraron las tablas y gráficas que se presentan en la sección de caracterización.

Etapas 6: Construcción de indicadores de replicabilidad

Para la etapa de construcción de los indicadores de replicabilidad, se investigó sobre 3 casos de éxito que se encuentran instalados actualmente en Colombia, uno por cada tipo de sistema solar fotovoltaicos (On Grid, Off Grid, Híbrido) y con base en estos proyectos se realizaron 3 indicadores de replicabilidad por cada aspecto de la sostenibilidad (Social, económico y ambiental).

Etapas 7: Conclusiones y recomendaciones

2.3 ETAPAS METODOLÓGICAS EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD CON INDICADORES TÉCNICOS Y AMBIENTALES

Etapas 1: Métricas y herramientas de medición

En esta etapa se realizó la búsqueda de las métricas técnicas y ambientales de medición de reducción de Ton de CO₂ y huella de carbono para sistemas solares fotovoltaicos y las herramientas para el análisis para los proyectos previamente estudiados. Se definieron las métricas y las normativas ISO 50001:2018 y la ISO 14064:2019. Luego de realizar la selección de las métricas y normativas que se iban a utilizar, se procedió a realizar el cálculo de la huella de carbono de los sistemas solares fotovoltaicos seleccionados previamente, teniendo como base las normas ISO 50001:2018 e ISO 14064:2019.

Etapas 2: Indicadores técnicos y ambientales

En esta etapa, con base en las métricas y herramientas de medición que se buscaron en la etapa anterior, se hicieron los indicadores técnicos y ambientales, allí se tuvo en cuenta la descripción, aplicación práctica y medición de cada uno de los indicadores aplicables a los sistemas solares fotovoltaicos en Colombia.

Etapas 3: Evaluación de la huella de carbono

En esta etapa se realiza la evaluación de la huella de carbono de los sistemas solares fotovoltaico en estudio, se tuvo en cuenta las etapas que aparecen en la norma ISO 14064:2019 y la norma ISO 50001:2018 (Definir los límites del proyecto, Línea base de emisiones, Emisiones del proyecto, Reducción neta de emisiones, Verificación del desempeño energético y Reporte y verificación).

Etapa 4: Impacto ambiental en biodiversidad y suelo

Para esta etapa se realizó una investigación sobre los impactos ambientales en biodiversidad y suelo que tienen los sistemas solares fotovoltaicos en Colombia, luego de esto se buscaron algunos ejemplos de estudios ambientales de sistemas solares fotovoltaicos instalados en Colombia y por último se planteó un impacto ambiental en cada uno de los sistemas solares fotovoltaicos que se están estudiando.

Etapa 5: Análisis financiero

En esta etapa se investigó sobre el costo nivelado de energía (LCOE) y la tasa interna de retorno (TIR), luego de conocer los conceptos y su manera de ser aplicados, se realizó el procedimiento para los casos de estudio y se obtuvo el resultado para cada uno de los sistemas solares fotovoltaicos.

Etapa 6: Barreras y oportunidades

En esta etapa se realizó una consulta sobre las leyes, decretos, normas, resoluciones y políticas públicas colombianas relacionadas con la energía solar fotovoltaica y las energías renovables en general; luego de esto se realizó un análisis de cada una de las normas encontradas y se buscaron sus barreras y oportunidades.

Etapa 7: Propuesta de políticas de mejora para las comunidades rurales y ZNI

Luego de realizar este trabajo investigativo se propusieron unas políticas de mejora para las comunidades rurales y zonas no interconectadas por parte de la autora del proyecto.

Etapa 8: Conclusiones y recomendaciones

3. CONTEXTO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA

Colombia enfrenta una deficiencia estructural en la implementación de un sistema energético sostenible, accesible, diverso y viable, situación que se agrava en las zonas rurales y no interconectadas (ZNI), donde viven más de 1.8 millones de colombianos sin acceso a energía eléctrica (Green, 2001).

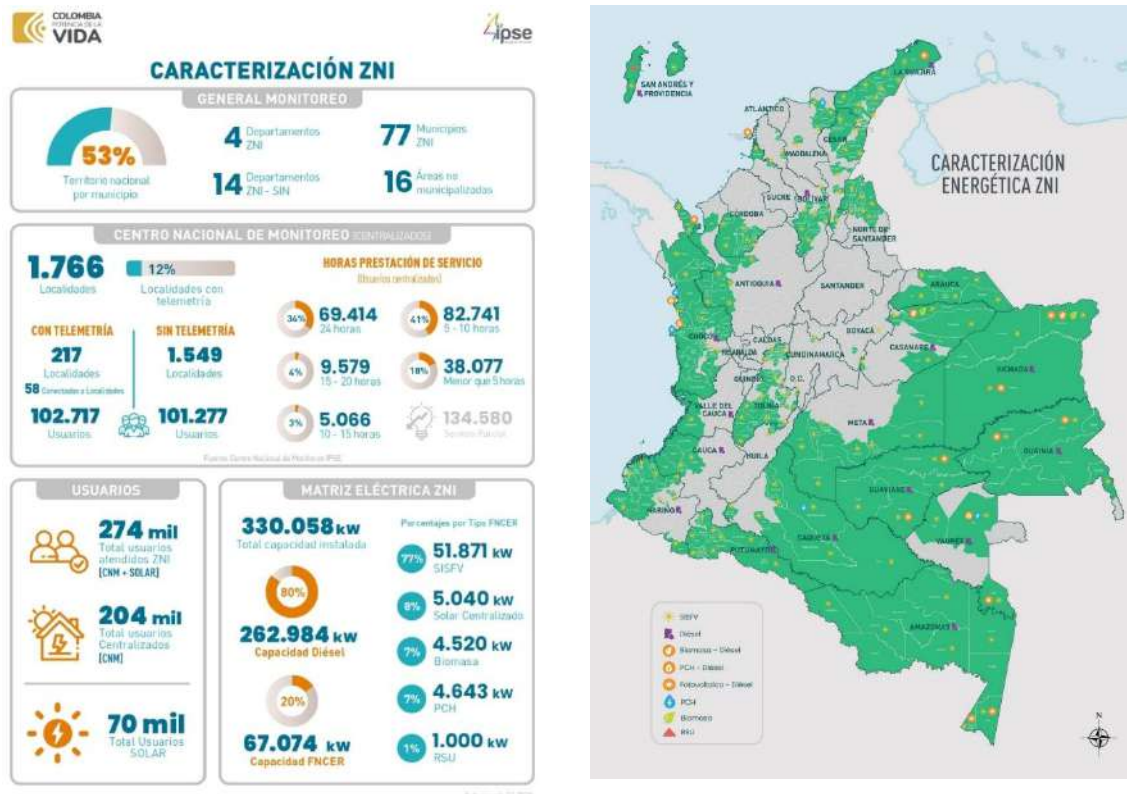
Imagen 1. Matriz energética de Colombia

Tecnología	Capacidad Efectiva Neta (MW)	%
 Hidráulica	13.220	63,7
 Térmica	6.274	30,2
 Solar	1.273	6,1

Fuente: (XM, 2024)

3.1 SITUACIÓN ACTUAL EN LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI)

Imagen 2. Situación actual zonas no interconectadas



Fuente: (IPSE, 2023)

Las ZNI se caracterizan por:

- Alta dependencia de plantas diésel, que generan altos costos operativos y emisiones contaminantes.
- Dificil acceso geográfico, con terrenos montañosos y de difícil acceso.
- Limitada infraestructura eléctrica, lo cual impide la conexión a la red nacional.
- Falta de inversión, financiación y planificación técnica adecuada para implementar soluciones renovables.
- Problemas regulatorios y trámites engorrosos que frenan la ejecución de proyectos.

3.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA

La energía solar fotovoltaica es una solución para estas regiones por su facilidad de instalación y bajo impacto ambiental. Sin embargo, su adopción enfrenta obstáculos importantes:

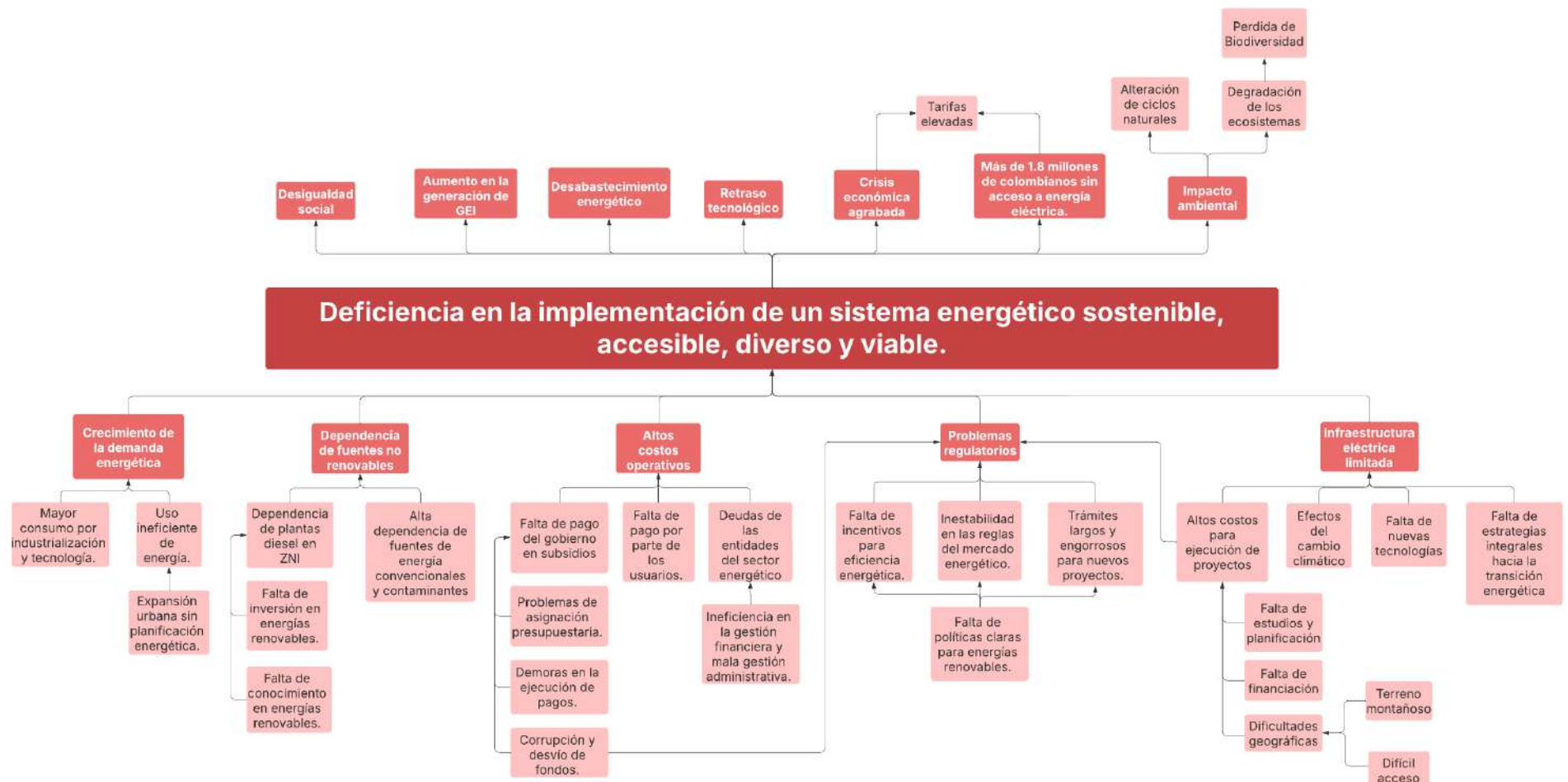
- Alta inversión inicial
- Falta de políticas claras e incentivos.
- Retraso tecnológico.
- Falta de conocimiento en comunidades y operadores.
- Corrupción, desvío de fondos, y problemas de gestión financiera en las empresas del sector.
- Dificultades para garantizar el pago de subsidios gubernamentales, lo cual compromete la sostenibilidad financiera de los proyectos.

3.3 ÁRBOL DE PROBLEMAS Y OBJETIVOS

Las imágenes presentadas a continuación, permiten comprender los principales retos y oportunidades en torno a la transición hacia un sistema energético sostenible en Colombia, con énfasis en el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica.

La imagen 3 evidencia las múltiples barreras estructurales que obstaculizan su implementación efectiva, estas problemáticas se traducen en impactos ambientales negativos, desigualdad social y una creciente vulnerabilidad energética. En contraste, la imagen 4 plantea un árbol de objetivos que traza un camino hacia la transformación del modelo energético actual, destacando soluciones como el fortalecimiento del marco regulatorio, la mejora de la infraestructura, la diversificación de la matriz energética y el impulso a tecnologías limpias y sostenibles, con una fuerte participación comunitaria.

Imagen 3. Árbol de problemas



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4. Árbol de objetivos



Fuente: Elaboración propia

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA

4.1 FUNDAMENTO TEORICOS

Sistemas solares fotovoltaicos

Un sistema solar fotovoltaico es un conjunto de dispositivos que convierten la energía solar en energía eléctrica mediante el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico. Estos sistemas están compuestos principalmente por paneles solares, un inversor, estructuras de soporte, y opcionalmente baterías para el almacenamiento de energía. (Luque & Hegedus, 2011).

Los sistemas fotovoltaicos están compuestos por módulos solares, inversores, reguladores de carga y baterías (en algunos casos). Las celdas solares convierten la luz del sol en corriente continua (DC), que se transforma en corriente alterna (AC) para uso doméstico o industrial.

En zonas rurales de Colombia, donde muchas comunidades no tienen acceso al servicio eléctrico, esta fuente representa una solución limpia, autónoma y sostenible para mejorar la calidad de vida, apoyar la producción agrícola y fortalecer servicios como salud y educación.

En zonas rurales, estos sistemas pueden ser pequeños, portátiles o comunitarios, y son fundamentales para hogares, escuelas y puestos de salud.

Imagen 5. Ejemplo sistema solar fotovoltaico aislado



Fuente: (Yangambi , s.f)

Tabla 3. Tipos sistemas solares fotovoltaicos

TIPO SFV	DEFINICIÓN	FUNCIONAMIENTO	VENTAJAS	EJEMPLO
Conectados a la red (On Grid):	Un sistema solar Fotovoltaico on-grid está conectado directamente al Sistema Interconectado Nacional (SIN) o a la red pública de electricidad. Este sistema no incluye baterías y depende de la red para respaldar el suministro cuando no hay sol (noche o días nublados) (IRENA, 2020)	Produce energía solar durante el día. Usa la energía generada directamente o la inyecta a la red. Si la producción excede el consumo, ese excedente se remunera o compensa. Cuando no hay producción solar, el sistema toma energía de la red.	Menor costo inicial (sin baterías). Posibilidad de vender excedentes de energía. (IRENA, 2020)	Instalaciones urbanas residenciales o comerciales.
Aislados (Off Grid):	Un sistema solar off-grid es autónomo, es decir, no está conectado a la red eléctrica pública. Está diseñado para operar de manera independiente, almacenando la energía en baterías para su uso posterior. (World bank, 2018)	Captura energía solar durante el día. La almacena en baterías para su uso nocturno o en días sin sol. Puede incorporar generadores diésel como respaldo.	Ideal para zonas rurales o sin acceso a la red. Autonomía total del usuario frente a la red eléctrica. (World bank, 2018)	Veredas sin acceso a red en la Amazonía colombiana.

Híbridos	Un sistema solar híbrido combina paneles solares con otras fuentes de energía (como red eléctrica, generadores diésel, eólica, etc.) y baterías. Puede operar con o sin conexión a la red, lo que lo hace más flexible y confiable.	Utiliza energía solar como fuente principal. Baterías almacenan el exceso para respaldo. Puede consumir energía de la red o de generadores si no hay producción solar suficiente.	Mayor confiabilidad. Permite el autoconsumo, almacenamiento y venta de excedentes. (Mousa, 2020)	Microredes en zonas no interconectadas del Caribe.
----------	---	---	---	--

Tipo de generadores en Colombia según la Resolución CREG 174 de 2021

- **Autogenerador:** Usuario que produce energía eléctrica principalmente para atender sus propias necesidades.
- **Autogenerador a Pequeña Escala (AGPE):** Usuario que produce energía eléctrica principalmente para atender sus propias necesidades, con una capacidad instalada o nominal igual o inferior a 1 MW.

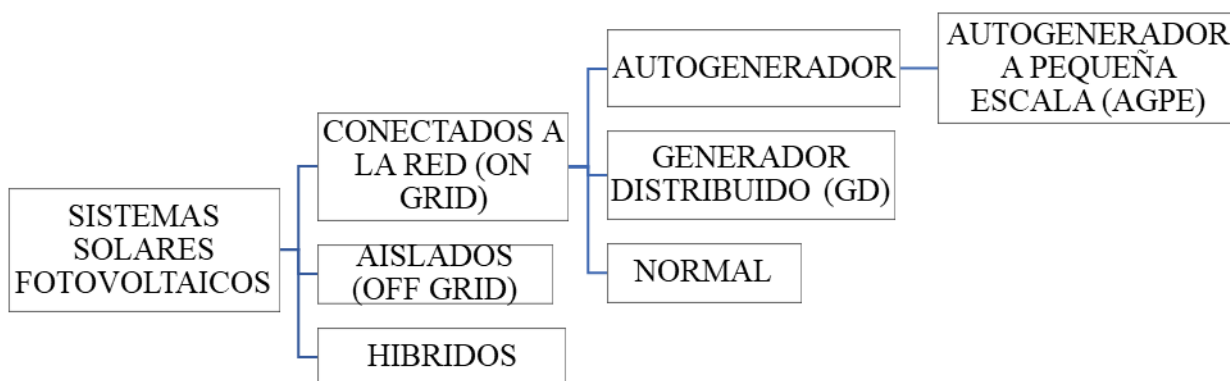
En zonas rurales: Puede ser una cooperativa campesina o una escuela rural con sistema solar.

- **Generador Distribuido (GD):** Generador que produce energía eléctrica para venderla al sistema, conectado en el nivel de tensión 1 del SIN.

En zonas rurales: Podría ser una granja o comunidad que produce más energía de la que consume y vende el excedente

- **Generador “Normal”:** Esta clasificación es común para plantas de generación convencionales que operan sin características especiales que las clasifiquen en otras categorías definidas por la regulación colombiana. Es aquel que:
 - No es un autogenerador ni un cogenerador.
 - Tiene una capacidad instalada superior a los límites establecidos para AGPE o GD.
 - Está conectado al SIN y participa en el mercado mayorista de energía. (CREG 070, 1998)

Imagen 6. Esquema de bloques clasificación sistemas solares fotovoltaicos

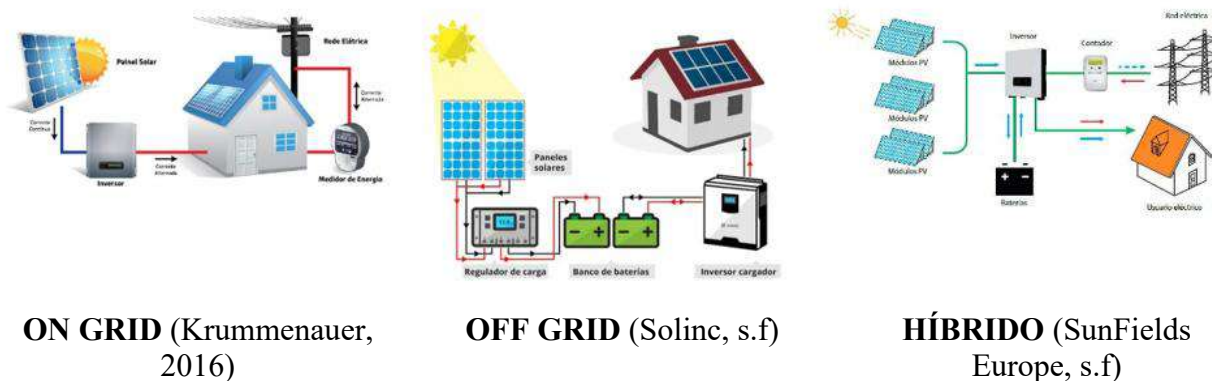


(Torres, 2025)

Tabla 4. Parámetros del sistema fotovoltaico típico

COMPONENTE	SFV ON GRID	SFV OFF GRID	HÍBRIDO
Módulo solar	SI	SI	SI
Controlador de carga	SI	SI	SI
Inversor de corriente	SI	SI	SI
Baterías	NO	SI	SI
Planta generadora	NO	NO	SI

Imagen 7. Esquema tipos de sistemas solares fotovoltaicos



5. IMPACTO DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN ZONAS RURALES Y ZNI EN COLOMBIA

La implementación de sistemas solares fotovoltaicos en comunidades rurales de Colombia puede tener un impacto significativo en múltiples dimensiones.

5.1 ECONÓMICO

- **Reducción de costos de energía:** Disminuye o elimina el gasto en combustibles fósiles (como diésel) o en electricidad de la red, que suele ser costosa y poco confiable en zonas apartadas.
- **Impulso a actividades productivas:** Facilita la operación de pequeños negocios, agroindustrias, sistemas de riego y refrigeración para productos agrícolas o pecuarios.
- **Generación de empleo local:** Se crean oportunidades en instalación, mantenimiento y educación técnica en energías renovables.

5.2 SOCIAL

- **Mejora de la calidad de vida:** Permite acceso continuo a servicios como iluminación, telecomunicaciones, televisión e internet.
- **Fortalecimiento educativo:** Facilita el uso de herramientas tecnológicas en escuelas rurales, mejora el entorno de estudio y permite clases nocturnas.
- **Acceso a salud:** Alimenta centros de salud rurales con electricidad confiable para equipos médicos y conservación de medicamentos.
- **Empoderamiento comunitario:** Las comunidades se vuelven más autosuficientes y menos dependientes del Estado o de empresas externas.

5.3 AMBIENTAL

- **Reducción de emisiones de carbono:** Sustituye fuentes contaminantes como generadores diésel por energía limpia.
- **Protección de ecosistemas:** Minimiza la necesidad de construir infraestructura eléctrica invasiva, como líneas de transmisión.
- **Mayor resiliencia ante desastres:** Los sistemas solares pueden seguir operando en contextos de emergencia, cuando otras fuentes fallan.

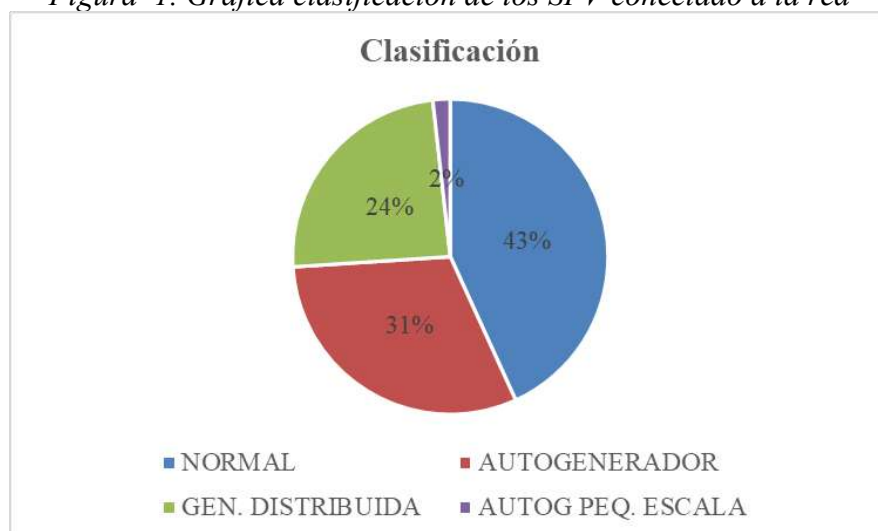
(Golden Energy S.A.S., 2025; Acción Solar Energy, s.f.; Fenoge, s.f.; Unergy, 2023; IPS Agencia de Noticias, 2024)

6. CONTEXTO ACTUAL DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA

6.1 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS LA RED

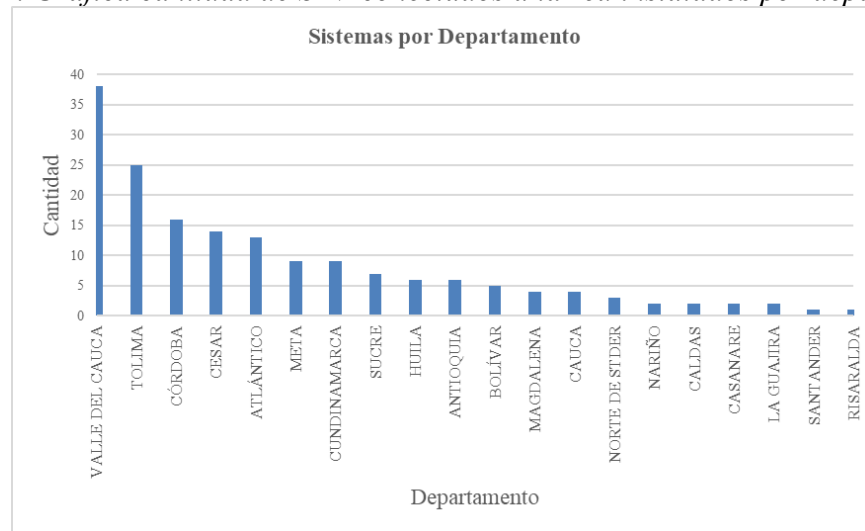
Para el análisis presentado a continuación, se tomó como referencia la información suministrada por XM de los sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red registrados ante el ASIC (Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales). Las tablas en las cuales se encuentran los datos con los cuales se realizaron las siguientes gráficas se encuentran en el Anexo 1.

Figura 1. Gráfica clasificación de los SFV conectado a la red



(Torres, 2025)

La gráfica 1 muestra la cantidad de sistemas según su tipo, se observa que la mayoría de los sistemas son de tipo “NORMAL” con 73, seguidos por autogeneradores con 52. Esto sugiere una tendencia hacia modelos tradicionales y de consumo propio, con relativamente baja adopción de sistemas a pequeña escala.

Figura 2. Gráfica cantidad de SFV conectados a la red instalados por departamento

(Torres, 2025)

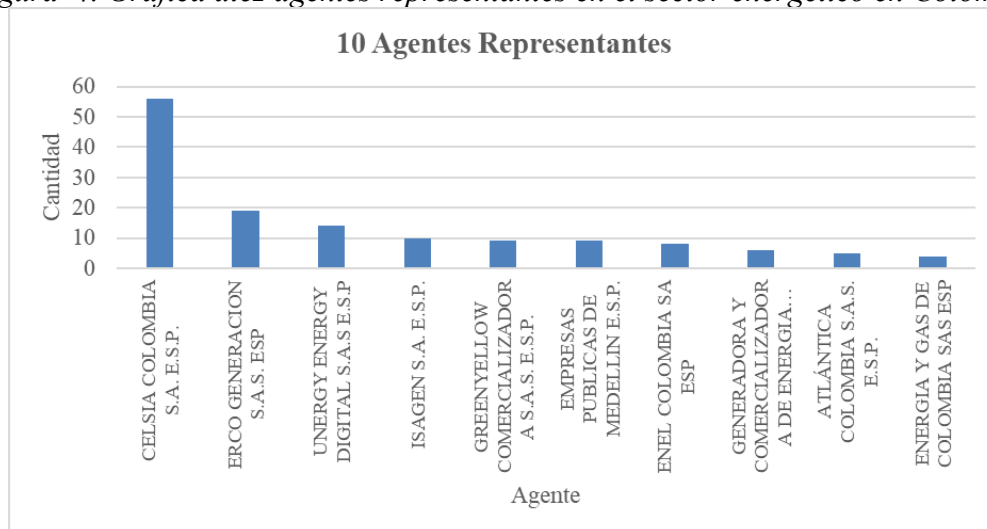
La gráfica anterior muestra los departamentos en los cuales se encuentran instalados sistemas solares fotovoltaicos, en el cual lidera el Valle del Cauca con 38 sistemas; Le siguen Tolima (25), Córdoba (16), Cesar (14), y Atlántico (13). La distribución geográfica muestra una concentración en zonas del suroccidente y el Caribe, posiblemente influida por niveles de radiación solar, infraestructura o incentivos regionales.

Figura 3. Gráfica estado del recurso de los SFV

(Torres, 2025)

En la gráfica se observa el porcentaje del estado operativo de los sistemas instalados en Colombia, Un porcentaje significativo aún está en pruebas (Aproximadamente 38%), lo cual indica un sector en expansión o transición. Solo un pequeño número está inactivo, lo cual sugiere buena tasa de implementación efectiva.

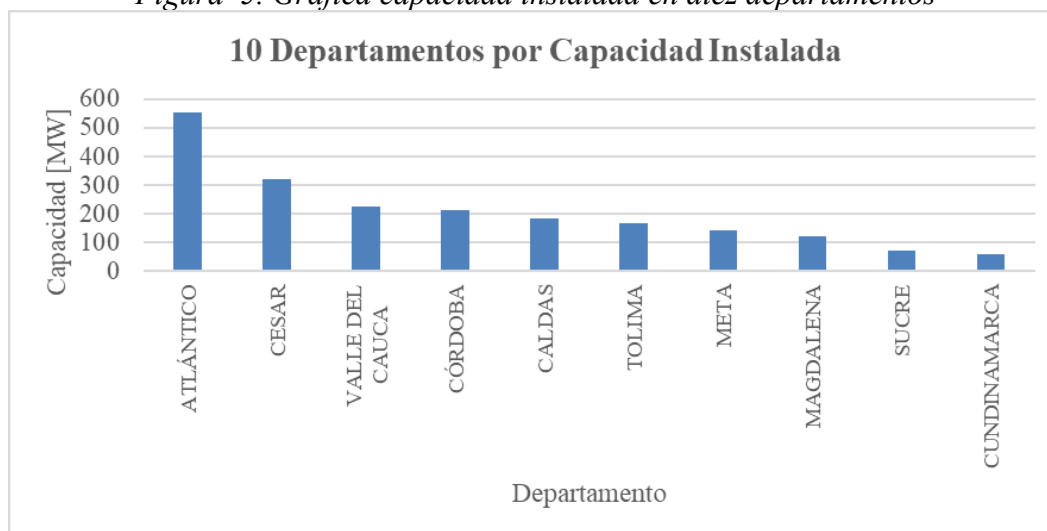
Figura 4. Gráfica diez agentes representantes en el sector energético en Colombia



(Torres, 2025)

Se observa en la gráfica que las empresas con mayor número de proyectos presentes en Colombia son Celsia con 56 sistemas, ERCO Generación con 19 sistemas y Unergy con 14 sistemas. El mercado parece estar liderado por unas pocas empresas grandes, con Celsia dominando de forma destacada. Esto puede implicar concentración de mercado o mayor capacidad de inversión de estas compañías.

Figura 5. Gráfica capacidad instalada en diez departamentos



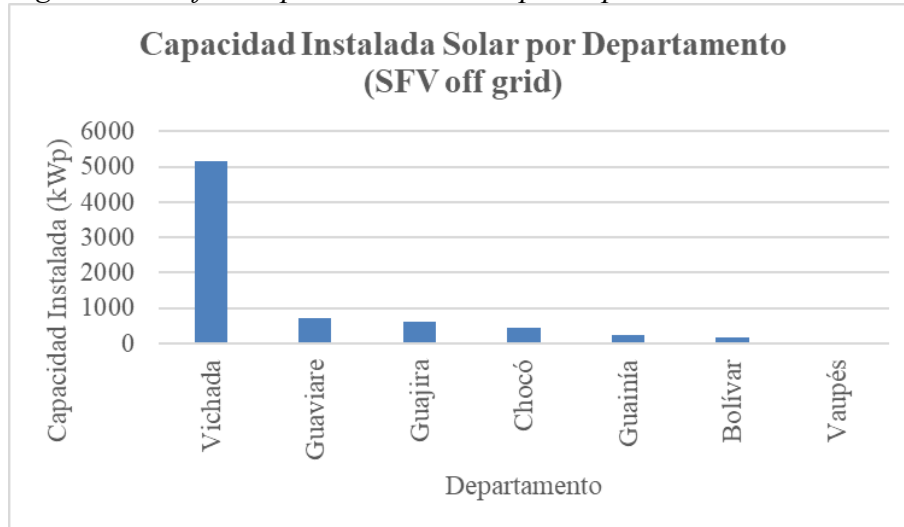
(Torres, 2025)

En la gráfica se observa que el departamento de Atlántico tiene la mayor capacidad (553 MW), seguido por Cesar (320 MW) y Valle del Cauca (223 MW); Aunque Valle del Cauca tiene más sistemas, Atlántico tiene más capacidad instalada, lo cual sugiere que los sistemas allí son más grandes o potentes.

6.2 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS AISLADOS (OFF GRID)

El análisis presentado a continuación, se realizó con base en datos encontrados en el Ministerio de Ambiente (Planas, Quintero, & Montealegre, 2021). Las tablas en las cuales se encuentran los datos con los cuales se realizaron las siguientes gráficas se encuentran en el Anexo 1.

Figura 6. Gráfica capacidad instalada por departamento SFV aislado



(Torres, 2025)

En la gráfica se observa que el departamento de Vichada destaca, con una barra muy superior al resto, evidenciando una fuerte concentración de capacidad solar off grid instalada en ese departamento. También se analiza que estos sistemas se encuentran instalados en zonas no interconectadas del sistema nacional.

"Es de anotar que existen numerosos sistemas fotovoltaicos individuales instalados en ZNI, 100% renovables, de los que no se tienen registros institucionales." (Planas, Quintero, & Montealegre, 2021, p. 19)

7. INDICES DE REPLICABILIDAD

Se realizaron los índices de replicabilidad con base en los sistemas presentados en la siguiente tabla. Para este análisis, se definieron tres índices ambientales, tres índices sociales y tres índices económicos, tomando como referencia las características técnicas, operativas y de gestión de cada sistema.

Tabla 5. Proyectos ejemplo para replicabilidad

NOMBRE DEL PROYECTO	TIPO DE SISTEMA	UBICACIÓN	CAPACIDAD INSTALADA	REFERENCIAS
Sistema Fotovoltaico Aislado Bocas del Atrato	Aislado (off grid)	Bocas del Atrato, Turbo, Antioquia	Variable por vivienda (300 - 1000 Wp)	UPME - Ministerio de Minas y Energía; Proyecto ZNI Turbo, 2022
Granja Solar Bosque Solar Los Llanos	Conectado a la red (On Grid)	Puerto Gaitán, Meta	86,2 MWp	Bosque Solar Los Llanos - Enel Green Power Colombia, 2021
Sistema Híbrido Solar-Diésel Isla de Providencia	Híbrido	Providencia, Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	1,3 MWp solar + respaldo diésel	Ministerio de Minas y Energía - Proyecto Providencia Renovable, 2022

Con base en la tabla anterior se realizaron los indicadores que se presentan a continuación;

Tabla 6. Indicadores de replicabilidad

ASPECTO	INDICADOR	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN
Social	Cobertura energética	Porcentaje de viviendas rurales beneficiadas con energía solar.	Número de viviendas conectadas
Social	Mejora en la calidad de vida	Porcentaje de usuarios que reportan mejoras gracias al acceso a energía.	Encuestas
Social	Horas diarias de acceso a energía	Promedio de horas continuas de energía disponibles al día.	Número de viviendas beneficiadas
Económico	Reducción del gasto energético	Porcentaje de disminución de costos energéticos por familia.	Porcentaje de ahorro

Económico	Costo por vivienda electrificada	Costo total del proyecto dividido entre viviendas beneficiadas.	Inversión por cada familia
Económico	Tiempo de retorno de inversión social	Años necesarios para recuperar la inversión.	Retorno de la inversión
Ambiental	Reducción de consumo de diésel	Litros de diésel evitados por año.	Litros consumidos antes – Litros consumidos después
Ambiental	Disminución de emisiones de CO ₂	Toneladas de CO ₂ evitadas por año.	(Litros de diésel evitados × 2.68 kg CO ₂ /litro) / 1000
Ambiental	Promoción de tecnologías limpias	Número de nuevos proyectos o réplicas del modelo.	Nuevos proyectos post-implementación

8. HERRAMIENTAS Y MÉTRICAS DE MEDICIÓN

8.1 MÉTRICAS TÉCNICAS Y AMBIENTALES DE MEDICIÓN

En la siguiente tabla se muestran las métricas de medición que se tendrán en cuenta para la realización del análisis de los proyectos previamente estudiados.

Tabla 7. Métricas técnicas y ambientales de medición

CATEGORÍA	MÉTRICA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Técnica	Energía generada	Energía eléctrica producida anualmente (Se mide con medidores o software del inversor) (UPME, s.f.)	kWh/año
	Factor de emisión evitado	Emisiones evitadas por cada kWh generado (Depende de la matriz energética del país) (UPME, s.f.)	kg CO ₂ /kWh
	Reducción de CO ₂ anual	Energía generada × Factor de emisión evitado	kg CO ₂ /año
	Vida útil del sistema	Tiempo de operación estimado (Aproximadamente 25 años) (2010 Solar Technologies, 2011)	Años
Ambiental	Huella de carbono incorporada	Emisiones de fabricación, transporte e instalación / energía generada	g CO ₂ eq/kWh
	Energy Payback Time (EPBT)	Energía usada en fabricación / energía generada anualmente (Tiempo para que el sistema compense su fabricación) (What is the energy payback for PV?, 2004)	Años
	Carbon Payback Time	Emisiones incorporadas / emisiones evitadas anualmente (Tiempo para neutralizar su huella de carbono) (What is the energy payback for PV?, 2004)	Años
	Emisiones netas evitadas	Reducción de CO ₂ – huella de carbono incorporada (Se puede proyectar para toda la vida útil)	kg CO ₂ /año

8.2 HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN

En la siguiente tabla se muestran las herramientas de medición que serán utilizadas para la realización del análisis de los proyectos previamente estudiados. (ISO 14064-2, 2019) (ISO 50001, 2018)

Tabla 8. Normas ISO para la medición

NORMA ISO	TÍTULO	DESCRIPCIÓN
ISO 14064-2:2019	Gases de efecto invernadero – Parte 2: Directrices a nivel de proyecto para la cuantificación, seguimiento y notificación de actividades de reducción de emisiones o aumento de remociones de gases de efecto invernadero.	Detalla el marco metodológico para la cuantificación de las metas de reducción de los GEI emitidos por una organización a través de planes, programas y proyectos. Se muestran los criterios para estructurar o diseñar proyectos de este tipo sin ir en contra de las directrices establecidas en el protocolo Kyoto
ISO 50001:2018	Sistemas de gestión de la energía	Permite establecer métricas de consumo, ahorro y eficiencia energética en instalaciones solares fotovoltaicas.

9. INDICADORES TÉCNICOS Y AMBIENTALES

Con base en las normas que se enuncian en la tabla 2, se realizaron los indicadores técnicos y ambientales que se presentan en la tabla 3.

Tabla 9. Indicadores técnicos y ambientales

TIPO	INDICADOR	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN PRÁCTICA	MEDICIÓN
Ambiental	Tasa de reducción de GEI	Emisiones evitadas por uso de energía solar en lugar de fósil	Reporte de impacto climático	tCO ₂ eq evitadas / año
	Índice de emisiones evitadas por unidad de energía	Reducción de GEI por cada kWh generado	Cálculo base para verificación de proyectos de compensación	kg CO ₂ eq / kWh
	Porcentaje de residuos reciclables del sistema	Materiales del sistema FV que pueden reciclarse al final de su vida útil	Planificación de economía circular	% reciclable
Técnico	Generación neta de energía solar	Energía útil generada por el sistema solar	Evaluación del rendimiento del sistema	kWh/mes o año
	Rendimiento del sistema (Performance Ratio, PR)	Eficiencia real del sistema frente al ideal	Diagnóstico de pérdidas y eficiencia	$PR (\%) = \frac{\text{Energía real}}{\text{Energía teórica}} \times 100$
	Factor de capacidad	Relación entre energía generada y la potencia nominal	Comparación de desempeño entre instalaciones	$(\%) = \frac{\text{Energía generada}}{\text{Potencia instalada} \times \text{horas del periodo}} \times 100$
	Energía autoconsumida vs. energía vertida	Cuánto de la energía generada es usada directamente	Optimización del consumo local	kWh autoconsumidos / kWh generados (%)
	Tasa de pérdida por degradación de paneles	Pérdida anual de capacidad de los módulos solares	Evaluación del envejecimiento del sistema	% anual

	Disponibilidad del sistema FV	Tiempo en que el sistema opera correctamente	Mantenimiento y confiabilidad del sistema	$(\%) = \frac{\text{Horas operativas}}{\text{Horas calendario}} \times 100$
Técnico-Ambiental	Intensidad energética del sitio	Relación entre el consumo energético y la producción solar	Medición de eficiencia en instalaciones productivas	kWh/m ² o kWh/unidad de producto

10. EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Para realizar la evaluación de la huella de carbono, se tomaron como base de partida las normas ISO 14064-2:2019 e ISO 50001:2018. En la tabla 4, se muestra el procedimiento que se debe realizar para evaluar la huella de carbono. (ISO 14064-2, 2019) (ISO 50001, 2018) (GHG Protocol, s.f.)

Tabla 10. Evaluación de la huella de carbono en sistemas solares fotovoltaicos

ETAPA	NORMA APLICABLE	DESCRIPCIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
Definir los límites del proyecto	ISO 14064-2:2019	Definir límites organizacionales, operacionales y temporales.	No aplica fórmula matemática	Responsabilidad, actividades cubiertas y periodo anual
Línea base de emisiones	ISO 14064-2:2019	Emisiones que se evitarían al usar solar FV en lugar de energía de red.	$E = \text{Energía generada (kWh)} \times \text{Factor de emisión (kg CO}_2\text{/kWh)}$	Energía generada estimada por el sistema FV (de diseño o monitoreo)
Emisiones del proyecto	ISO 14064-2:2019	Emisiones durante fabricación, transporte, instalación y operación del sistema FV.	Suma de emisiones por etapa del ciclo de vida	Emisiones totales
Reducción neta de emisiones	ISO 14064-2:2019	Diferencia entre emisiones evitadas y emisiones del proyecto.	$\text{Reducción} = \text{Línea base} - \text{Emisiones reales}$	Diferencia entre los dos valores anteriores
Verificación del desempeño energético	ISO 50001:2018	Indicadores energéticos para validar mejoras: PR, autoconsumo, eficiencia.	$\text{PR} = \frac{\text{Energía real}}{\text{Energía teórica}}$ Otros: kWh/m², % de autoconsumo	Mejora continua del desempeño energético
Reporte y verificación	ISO 14064-2:2019	Documentación y trazabilidad de datos para verificación interna/externa.	Uso de protocolos IPCC, GHG Protocol, herramientas	Preparación para auditorías o validaciones externas

			como RETSscreen	
--	--	--	--------------------	--

Con base en la tabla 4, se procedió a realizar el cálculo de la huella de carbono para los sistemas solares fotovoltaicos seleccionados en el diagnóstico previo (Sistema Fotovoltaico Aislado Bocas del Atrato, Granja Solar Bosque Solar Los Llanos y Sistema Híbrido Solar-Diésel Isla de Providencia). El procedimiento para el cálculo de la huella de carbono se encuentra en detalle en el anexo 1 y los resultados de estos se presentación en la tabla 5.

Para la realización de estos cálculos se tuvieron como punta de partida los parámetros generales de los proyectos como la energía generada, capacidad instalada, irradiancia solar, entre otros. Por otro lado, según datos del IPCC y UPME Colombia, el factor promedio de emisión para plantas diésel es: 0.80–0.90 toneladas de CO₂e por MWh generado. (UPME, 2021)

Tabla 11. Resultados cálculo huella de carbono

ETAPA	SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO BOCAS DEL ATRATO		GRANJA SOLAR BOSQUE SOLAR LOS LLANOS		SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-DIÉSEL ISLA DE PROVIDENCIA	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Definir los límites del proyecto	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Línea base de emisiones [TonCO ₂ eq]	1.191	1.340	280.000	315.000	3.784	4.257
Emisiones del proyecto [TonCO ₂ eq]	1.183	1.972	262.500	437.500	3.548	5.913
Reducción neta de emisiones [TonCO ₂ eq]	8	-632	17.500	-122.500	0.236	-1.656
Verificación del desempeño energético [%]	85.1%		87,5%		90.0%	

11. IMPACTO AMBIENTAL EN BIODIVERSIDAD Y SUELO DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA

- **Pérdida y fragmentación de hábitats:** La instalación de parques solares puede provocar la fragmentación de ecosistemas, reduciendo la conectividad entre hábitats y afectando la movilidad de especies. (Domínguez del Valle, 2020)
- **Desplazamiento de fauna:** La presencia de infraestructuras solares puede causar el desplazamiento de especies animales debido a la alteración de su entorno natural. (Domínguez del Valle, 2020)
- **Efecto barrera:** Las instalaciones solares pueden actuar como barreras físicas que interrumpen los corredores ecológicos, afectando la migración y dispersión de especies. (Domínguez del Valle, 2020)
- **Alteraciones microclimáticas:** Los paneles solares pueden modificar las condiciones microclimáticas locales, como la temperatura y la humedad del suelo, lo que puede influir en la composición de la vegetación y la fauna asociada. (R.C, 2024)
- **Conflictos con actividades tradicionales:** En algunas regiones, la instalación de parques solares ha interferido con prácticas agrícolas y ganaderas, generando tensiones con las comunidades locales.

11.1 EJEMPLOS DE ESTUDIOS AMBIENTALES EN PROYECTOS SOLARES EN COLOMBIA

Parque Solar FV Refisol 99 MW (Santander)

Este estudio de impacto ambiental se centró en la caracterización de la fauna local, incluyendo mamíferos, aves, reptiles y anfibios. Se realizaron inventarios de biodiversidad para establecer una línea base ecológica y se implementaron metodologías rigurosas aprobadas por la autoridad ambiental regional. Estas acciones permitieron diseñar estrategias de mitigación y monitoreo para preservar la biodiversidad local. (SIB, 2024)

Parque Solar Wimke (Guajira)

Ubicado en un ecosistema de bosque seco tropical, este proyecto consideró áreas intervenidas con pastos arbolados y remanentes de bosque de galería. El estudio de impacto ambiental identificó las coberturas vegetales existentes y evaluó los posibles efectos sobre la biodiversidad, proponiendo medidas para minimizar la fragmentación del hábitat y conservar las especies locales. (SIB, 2023)

Parque Solar Fotovoltaico Tepuy (La Dorada, Caldas)

Este proyecto de 96,7 MW, ubicado en una zona de alta biodiversidad, se desarrolló con un enfoque en la conservación ambiental. Se realizaron estudios detallados que identificaron más de 3.600 registros biológicos, incluyendo plantas, hongos, animales y microorganismos. Estas acciones permitieron diseñar estrategias de mitigación y monitoreo para preservar la biodiversidad local. (SIB, 2024)

Planta Solar La Mata (Cesar)

Este estudio consideró dos escenarios: con y sin proyecto, para evaluar los posibles cambios en el territorio y sus componentes. Se identificaron impactos negativos y positivos, y se propusieron medidas de manejo ambiental para mitigar los efectos adversos sobre los servicios ecosistémicos existentes en el área de influencia del proyecto. (TC proyectos y consultorías, 2021)

Proyecto Atlántico Photovoltaic (Atlántico)

Con una capacidad de 199,5 MW, este proyecto se conectará al Sistema Interconectado Nacional mediante una línea de transmisión de 3,2 km. El estudio de impacto ambiental evaluó los posibles efectos sobre la biodiversidad y el uso del suelo, proponiendo estrategias para minimizar los impactos negativos y promover la sostenibilidad del proyecto. (SIB, 2024)

11.2 IMPACTO AMBIENTAL EN BIODIVERSIDAD Y SUELO EN LOS PROYECTOS SFV DE ESTUDIO

11.2.1. SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO BOCAS DEL ATRATO

CARACTERÍSTICAS GENERALES EN BOCAS DEL ATRATO, TURBO, ANTIOQUIA

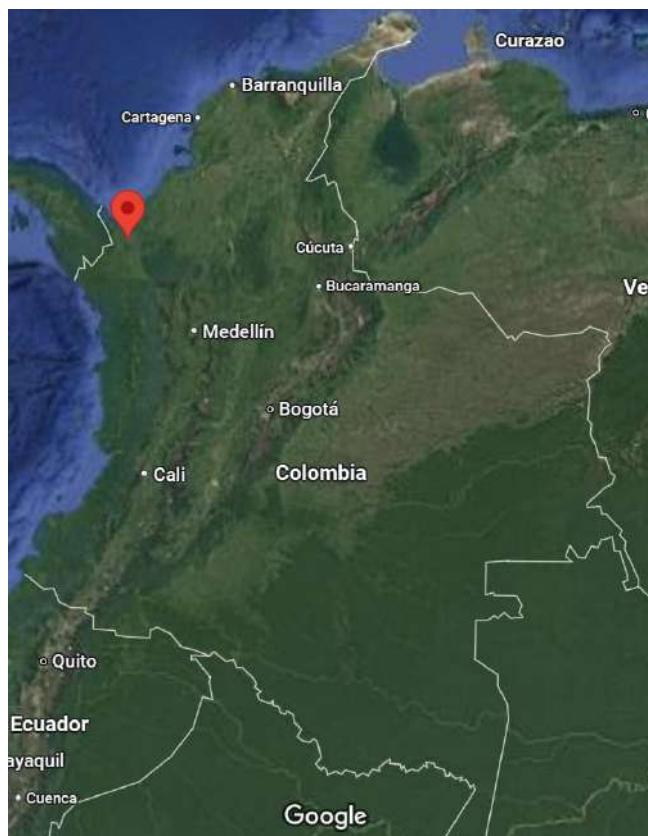
- **Biodiversidad**

Bocas del Atrato, ubicado en el municipio de Turbo, Antioquia, es un ecosistema estuarino de alta biodiversidad donde confluyen aguas dulces del río Atrato y salinas del golfo de Urabá. Este territorio alberga al menos 52 especies de peces pertenecientes a 27 familias, además de una rica avifauna compuesta por especies como la espátula rosada (*Platalea ajaja*), el bucon cabecipardo (*Notharchus tectus*) y miles de buitres de Turquía migratorios (*Cathartes aura*). También es hábitat de mamíferos como jaguares, pumas y monos araña, y reptiles asociados a los manglares y ciénagas. La vegetación predominante incluye manglares, bosques de galería y vegetación acuática. Este entorno natural cumple funciones clave como la protección costera, soporte de actividades pesqueras y hábitat de especies en riesgo, siendo considerado una zona prioritaria para la conservación en Colombia. (Arango Sánchez, 2019) (e3asesorias, s.f)

- **Ubicación**

Coordenadas: 8.081690, -76.856690

Imagen 8. Ubicación sistema SFVaislado Bocas del Atrato



Fuente: (8°04'54.1"N 76°51'24.1"W MAPS, s.f)

11.2.1 GRANJA SOLAR BOSQUE SOLAR LOS LLANOS

CARACTERÍSTICAS GENERALES EN PUERTO GAITÁN, META

- **Biodiversidad**

Puerto Gaitán, en el departamento del Meta, se destaca por su rica biodiversidad, albergando una variedad de ecosistemas como sabanas, bosques de galería y humedales. En la microcuenca alta del río Tillavá, se han identificado 369 especies de flora pertenecientes a 84 familias, incluyendo especies adaptadas a sabanas inundables y bosques de galería. La fauna es igualmente diversa; en la Eco-reserva Ocelote, se han registrado 179 especies de animales, entre ellas el yaguarundi (*Herpailurus yagouaroundi*), un felino esquivo cuya presencia indica un ecosistema saludable. Además, en la laguna La Española, se han documentado 30 especies de cladóceros, pequeños crustáceos esenciales para la cadena

trófica acuática. Estas áreas protegidas, como la Eco-reserva Ocelote y la Ecoreserva Campo Rubiales, desempeñan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad y en la promoción de prácticas sostenibles en la región. (León, 2023) (Ramos-Torres & Esqueda, 2017) (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2022) (SIB, 2023) (CEIBA, 2022)

- **Ubicación**

Coordenadas: 4.218000, -72.022100

Imagen 9. Ubicación Granja solar bosque solar los llanos



Fuente: (4°13'04.8"N 72°01'19.6"W MAPS, s.f)

IMPACTO AMBIENTAL EN BIODIVERSIDAD Y SUELO

El proyecto Bosques Solares de los Llanos 6, ubicado en Puerto Gaitán, Meta, ha sido objeto de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) que evalúa detalladamente sus efectos sobre la biodiversidad y el suelo. Este estudio, realizado por ARCACOL S.A.S. y aprobado por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) mediante la Resolución 02155, incluye una caracterización biótica que abarca anfibios, reptiles, aves, mamíferos, vegetación terrestre y epífitas vasculares y no vasculares. El área de estudio comprende diversas

coberturas, como pastos limpios, pastos arbolados, bosque denso alto inundable y zonas pantanosas, según la clasificación Corine Land Cover adaptada para Colombia. (SIB, 2023)

En cuanto al suelo, el EIA identifica que la construcción y operación de la planta solar pueden generar impactos como la compactación del suelo, alteración de la permeabilidad y cambios en la microtopografía. Para mitigar estos efectos, se proponen medidas como la revegetación de áreas intervenidas, el control de la erosión y la implementación de prácticas de manejo sostenible del suelo. (BID Invest, 2021)

Además, el proyecto contempla un Plan de Manejo Ambiental que incluye programas de monitoreo de la biodiversidad y del estado del suelo, así como acciones de compensación ambiental para preservar y restaurar los ecosistemas afectados. Estas medidas buscan garantizar que la generación de energía solar se realice de manera sostenible, minimizando los impactos negativos sobre el medio ambiente. (BID Invest, 2021)

11.2.2 SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-DIÉSEL ISLA DE PROVIDENCIA

CARACTERÍSTICAS GENERALES EN PROVIDENCIA, ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA

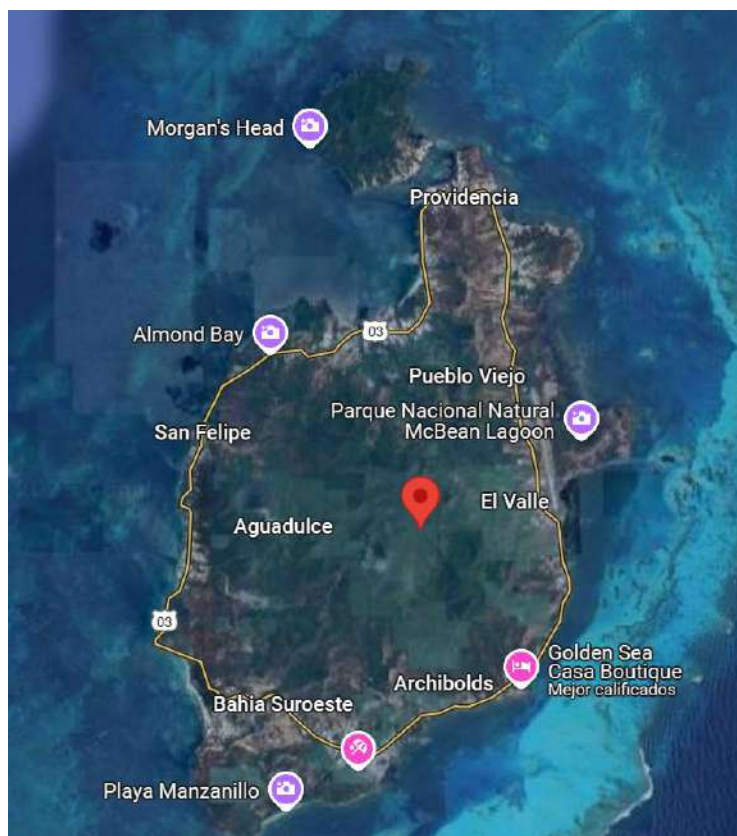
- **Biodiversidad**

Providencia, en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, alberga una biodiversidad excepcional tanto terrestre como marina. Su ecosistema incluye bosques secos tropicales con especies endémicas como el lagarto de Providencia (*Anolis pinchoti*) y el gecko pestañado (*Aristelliger georgeensis*), así como manglares que sirven de hábitat para diversas aves y reptiles. En sus aguas se encuentra el Parque Nacional Natural Old Providence McBean Lagoon, que protege el arrecife coralino más extenso de Colombia, hogar de numerosas especies marinas. La isla también forma parte de la Reserva de Biosfera Seaflower, reconocida por la UNESCO, que busca conservar la riqueza ecológica y cultural del archipiélago. A pesar de los desafíos ambientales, Providencia continúa siendo un refugio vital para la biodiversidad del Caribe colombiano. (Prensa Instituto Humboldt, 2021) (Reserva de Biosfera Seaflower, s.f)

- **Ubicación**

Coordenadas: 13.350000, -81.370000

Imagen 10. Ubicación Sistema híbrido solar-diésel Isla de Providencia



Fuente: (MAPS 13°21'00.0"N 81°22'12.0"W, s.f)

IMPACTO AMBIENTAL EN BIODIVERSIDAD Y SUELO

Impactos Positivos

- **Reducción de Emisiones:** La integración de energía solar puede disminuir la dependencia de generadores diésel, reduciendo las emisiones de CO₂ y otros contaminantes atmosféricos.
- **Mejora en la Calidad del Aire:** Menor uso de combustibles fósiles contribuye a una mejor calidad del aire local.
- Revegetación y restauración ecológica.
- Monitoreo biótico continuo.
- Planes de manejo ambiental aprobados por la ANLA.

Impactos Negativos

- **Alteración de Hábitats:** La construcción de infraestructuras puede destruir o fragmentar hábitats críticos para especies locales.
- **Erosión del Suelo:** Las actividades de construcción y operación pueden incrementar la erosión, especialmente en áreas con suelos susceptibles.

- **Contaminación del Agua:** Posibles derrames de combustible o lubricantes pueden afectar cuerpos de agua cercanos.

Los proyectos solares en Colombia tienden a desarrollarse en zonas ecológicamente sensibles, lo cual implica una alta responsabilidad en términos de conservación. Si bien existen planes de manejo ambiental, su eficacia depende de una correcta ejecución y seguimiento, especialmente en territorios de alta biodiversidad como Providencia o el Chocó.

Los SFV generan impactos ambientales importantes, pero si se planifican y ejecutan con criterios de sostenibilidad, es posible reducir significativamente los efectos adversos sobre biodiversidad y suelo.

12. ANÁLISIS FINANCIERO

12.1 COSTO NIVELADO DE LA ENERGÍA

12.1.1. ¿QUÉ ES EL LCOE?

El LCOE (Levelized Cost of Energy o Costo Nivelado de la Energía) es una medida económica que permite estimar el costo promedio por unidad de energía generada (generalmente en kWh) a lo largo de la vida útil de una planta de generación eléctrica. Este indicador integra todos los costos involucrados en la construcción, operación y mantenimiento de un proyecto, así como la producción energética esperada, descontada al valor presente.

- **Formula general**

$$\text{LCOE} = (\sum [It + Mt + Ft] / (1 + r)^t) / (\sum [Et] / (1 + r)^t)$$

Donde:

- It: Inversión de capital en el año t
- Mt: Costos de operación y mantenimiento
- Ft: Costos de combustible (si aplica)
- Et: Energía generada
- r: Tasa de descuento
- t: Año considerado

- **Factores que afectan el LCOE**

1. Inversión inicial (CAPEX)
2. Costos operativos (OPEX)
3. Vida útil del sistema
4. Energía generada
5. Tasa de descuento
6. Inclusión de baterías o sistemas híbridos

12.1.2 ¿PARA QUÉ SIRVE EL LCOE?

El LCOE es una herramienta clave para comparar diferentes tecnologías de generación de energía (solar, eólica, térmica, hidroeléctrica, etc.) en términos económicos. Es útil tanto para tomadores de decisiones, como gobiernos, inversionistas y desarrolladores, ya que permite analizar la viabilidad y competitividad económica de proyectos energéticos.

12.1.3. CÁLCULO LCOE PARA LOS PROYECTOS SFV DE ESTUDIO

Estos cálculos son estimaciones basadas en datos disponibles y supuestos razonables. Para obtener valores más precisos, se requeriría información detallada de cada proyecto.

➤ SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO BOCAS DEL ATRATO

Ubicación: Bocas del Atrato, Turbo, Antioquia

Tipo de sistema: Fotovoltaico aislado

Capacidad estimada: 0,5 MWp (500 kWp)

Inversión inicial estimada: USD 1.000.000

Costos anuales de operación y mantenimiento (O&M): USD 20.000

Producción anual estimada: 700.000 kWh

Vida útil del proyecto: 25 años

Tasa de descuento: 8%

- **Cálculo del LCOE**

Valor presente de O&M≈196.362

Valor presente de la producción≈6.872.670

LCOE≈0,174 USD/kWh

El Sistema Fotovoltaico Aislado Bocas del Atrato tiene un LCOE intermedio, reflejando los mayores costos asociados a sistemas aislados y de menor escala.

➤ GRANJA SOLAR BOSQUE SOLAR LOS LLANOS

Ubicación: Puerto Gaitán, Meta

Capacidad instalada: 125 MWp

Inversión inicial estimada: USD 100.000.000

Costos anuales de O&M: USD 2.000.000

Producción anual estimada: 200.000.000 kWh

Vida útil del proyecto: 25 años

Tasa de descuento: 8%

- **Cálculo del LCOE**

Valor presente de O&M ≈ 19.636.200

Valor presente de la producción ≈ 1.963.620.000

LCOE ≈ 0,061 USD/kWh

La Granja Solar Bosque Solar Los Llanos presenta el LCOE más bajo, lo cual es típico en proyectos a gran escala debido a economías de escala y menores costos por unidad de energía generada.

➤ **SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-DIÉSEL ISLA DE PROVIDENCIA**

Ubicación: Isla de Providencia

Capacidad instalada: 1,8 MWp solar + 2,5 MW almacenamiento

Inversión inicial estimada: USD 10.000.000

Costos anuales de O&M: USD 250.000

Producción anual estimada: 2.500.000 kWh

Vida útil del proyecto: 25 años

Tasa de descuento: 8%

- **Cálculo del LCOE**

Valor presente de O&M ≈ 2.454.525

Valor presente de la producción ≈ 24.545.250

LCOE ≈ 0,507 USD/kWh

El Sistema Híbrido Solar-Diésel Isla de Providencia muestra el LCOE más alto, influenciado por la combinación de tecnologías y los costos adicionales asociados al almacenamiento y operación en una isla remota.

Tabla 12. Resumen LCOE proyectos SFV en estudio

Proyecto	LCOE Estimado (USD/kWh)
Sistema Fotovoltaico Aislado Bocas del Atrato	0,174
Granja Solar Bosque Solar Los Llanos	0,061
Sistema Híbrido Solar-Diésel Isla de Providencia	0,507

12.2 TASA INTERNA DE RETORNO FINANCIERA (TIR)

La TIR, o Tasa Interna de Retorno Financiera, es un indicador que se utiliza para evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión. Representa la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) de todos los flujos de caja del proyecto sea igual a cero.

TIR > tasa de descuento esperada → Proyecto rentable

TIR = tasa de descuento esperada → Proyecto en equilibrio

TIR < tasa de descuento esperada → Proyecto no rentable

➤ SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO BOCAS DEL ATRATO

Para el precio de venta de kWh, se asume un valor común en zonas no interconectadas: USD 0,25 / kWh

Ingresos anuales = 700.000 kWh × 0,25 USD/kWh = USD 175.000 / año

Flujo neto anual

Flujo neto anual = Ingresos - Costos O&M

Flujo neto anual = 175.000 - 20.000 = USD 155.000 / año

Tabla 13. Flujo neto en un intervalo de tiempo

Año	Flujo
0	-1.000.000
1-25	+155.000 cada año

TIR ≈ 13,5%

➤ GRANJA SOLAR BOSQUE SOLAR LOS LLANOS

Para el precio de venta del kWh, se asume un valor de USD 0,06 / kWh (precio promedio a gran escala en Colombia)

Flujo neto anual

Flujo neto anual = Ingresos - Costos O&M

Flujo neto anual = 175.000 - 20.000 = USD 155.000 / año

Tabla 14. Flujo neto en un intervalo de tiempo

Año	Flujo
0	-100.000.000
1-25	+10.000.000 cada año

TIR $\approx$ 9,7%

➤ SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-DIÉSEL ISLA DE PROVIDENCIA

Para el precio de venta del kWh, se asume un valor de USD 0,40 / kWh (alto por ser zona insular, sustituye generación cara)

Flujo neto anual

Flujo neto anual = Ingresos - Costos O&M

Flujo neto anual = 175.000 - 20.000 = USD 155.000 / año

Tabla 15. Flujo neto en un intervalo de tiempo

Año	Flujo
0	-10.000.000
1-25	+750.000 cada año

TIR $\approx$ 8,5%

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la tasa interna de retorno para los sistemas solares fotovoltaicos casos de estudio.

Tabla 16. Resumen resultados TIR sistemas solares fotovoltaicos

Proyecto FV estudio	Inversión inicial (USD)	Flujo anual (USD)	TIR (%)	Retorno simple (años)
Granja solar bosque solar los llanos	100.000.000	10.000.000	9,7%	10 años
Sistema híbrido solar-diésel Isla de Providencia	10.000.000	750.000	8,5%	13,3 años

Sistema fotovoltaico aislado Bocas del Atrato	1.000.000	155.000	13,5%	6,45 años
---	-----------	---------	-------	-----------

Los proyectos grandes tienen mayor eficiencia económica por sus menores costos unitarios de generación. Los proyectos en zonas no interconectadas tienen mayores costos por unidad, pero cumplen un papel social clave, llevando energía a comunidades vulnerables. Aunque Providencia tiene el LCOE más alto, su contribución a la descarbonización y autonomía energética en zonas remotas es significativa.

Los resultados financieros muestran que la rentabilidad depende del tamaño, la ubicación y la tecnología. No obstante, la rentabilidad no debe evaluarse solo desde lo económico, sino también desde el impacto social y ambiental positivo.

12.3 OPORTUNIDADES Y BARRERAS ECONÓMICAS Y POLÍTICAS

En la siguiente tabla, se enuncian las normas, leyes, decretos, resoluciones y políticas públicas que rigen los sistemas solares fotovoltaicos en Colombia. Se enuncian las oportunidades y barreras de cada una de estas.

Tabla 17. Oportunidades y barreras económicas y políticas

NORMA	OPORTUNIDADES	BARRERAS / LIMITACIONES
Ley 1715 de 2014	Incentivos tributarios (IVA, renta, aranceles); Promueve inversión en ERNC; Abre mercado para autogeneradores y comercializadores.	Trámites complejos para acceder a incentivos; Falta de conocimiento sobre cómo aplicar los beneficios.
Ley 2099 de 2021	Amplía actores (gestores de demanda, comunidades energéticas); Impulsa democratización de la energía; Promueve redes inteligentes y almacenamiento.	Todavía en fase de implementación; muchos lineamientos requieren reglamentación posterior.
Decreto 2143 de 2015	Define procedimientos claros para obtener beneficios tributarios. (Exención del IVA en Paneles, Inversores y controladores)	Procedimientos administrativos pueden ser engorrosos y desincentivar a pequeños proyectos.
Decreto 0570 de 2018 (FENOGE)	Financia proyectos solares en zonas rurales y no interconectadas; Reduce barreras de acceso al financiamiento.	Fondos limitados frente a la gran demanda de proyectos.
Decreto 348 de 2017	Facilita acceso a red para autogeneradores y generación distribuida.	Limitaciones técnicas de las redes para integrar grandes cantidades de energía distribuida.

Resolución CREG 030 de 2018	Define reglas claras para pequeños autogeneradores y generación distribuida; Facilita compensación de excedentes energéticos.	Proceso de conexión puede ser largo y costoso, especialmente para pequeños usuarios.
Resolución CREG 174 de 2021	Introduce normas para integrar almacenamiento, aumentando eficiencia y flexibilidad del sistema.	Requiere inversiones adicionales en tecnologías aún costosas (baterías, gestión inteligente).
Plan Nacional de Desarrollo (PND)	Fija metas concretas de transición energética; Integra renovables en políticas de desarrollo nacional.	Alcance depende de la voluntad política y la capacidad de implementación en los territorios.
CONPES 3934 de 2018 – Política de Crecimiento Verde	Establece lineamientos para una economía baja en carbono; incluye metas para energías renovables, eficiencia energética y reducción de emisiones.	Falta de articulación interinstitucional; bajo presupuesto asignado para implementación.
CONPES 4075 de 2022 – Política de Transición Energética	Orienta acciones concretas para la transición energética justa; impulsa inversión en renovables y fomenta inclusión social y territorial.	Necesita articulación fuerte entre niveles nacional y local; riesgo de rezago en regiones más apartadas.
Agenda Nacional de Investigación en Energía (ANIE)	Promueve investigación y desarrollo (I+D) en tecnologías renovables, incluyendo solar, almacenamiento, redes inteligentes.	Bajo financiamiento de proyectos de I+D; débil conexión entre academia, industria y Estado.
Estrategia de Movilidad Eléctrica	Fomenta uso de energía solar para cargadores y estaciones de vehículos eléctricos; reduce demanda de fósiles.	Requiere alta inversión en infraestructura; dependencia de apoyo del sector privado.
Política de Zonas No Interconectadas (ZNI)	Prioriza implementación de sistemas solares autónomos en regiones rurales, para garantizar acceso básico a energía.	Dificultades logísticas por geografía compleja; dependencia de subsidios; riesgo de sostenibilidad a largo plazo.
Plan Energético Nacional (PEN) 2020-2050	Traza hoja de ruta de largo plazo para diversificación energética, incluyendo masificación de sistemas solares.	Retos para asegurar cumplimiento de metas; requiere coordinación multisectorial sostenida.

13. PROPUESTA DE POLÍTICAS DE MEJORA PARA LAS COMUNIDADES RURALES Y NO INTERCONECTADAS

En Colombia, uno de los principales problemas actuales es la complejidad de los trámites para legalizar sistemas solares. Por eso, se deben simplificar los procesos, reducir los costos y crear una ventanilla única digital que permita agilizar los permisos. Esta ventanilla también debe ofrecer acompañamiento técnico, especialmente a comunidades que no cuentan con experiencia en estos temas.

La transición energética debe ser justa y regenerativa. Esto significa que no solo debe reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también contribuir a la restauración ambiental, al fortalecimiento de las comunidades. Por eso, las decisiones sobre estos proyectos deben tomarse con la participación activa de las comunidades.

El acceso a la energía debe estar vinculado al fortalecimiento de actividades productivas sostenibles como la agroindustria local, la refrigeración de alimentos, la transformación de productos agrícolas y el turismo comunitario. Para lograrlo, es clave ofrecer incentivos y capacitación que permitan generar cadenas de valor sostenibles y promover una economía circular en las regiones.

Es importante incluir temas de energía renovable, medio ambiente y conocimiento sobre el uso responsable de la energía en las escuelas rurales y crear programas de formación para jóvenes, docentes y líderes comunitarios.

Para garantizar la sostenibilidad financiera de estos proyectos, se deben crear subsidios dirigidos y tarifas especiales para las comunidades más vulnerables. También es importante apoyar modelos de gestión colectiva, como cooperativas energéticas, que permitan a las comunidades organizarse y administrar su propia energía.

Cada proyecto debe contar con una evaluación que mida su impacto social, ambiental y económico. Esta evaluación debe ser participativa y utilizar indicadores claros que permitan hacer seguimiento al beneficio real que trae la energía renovable a las comunidades.

Se deben fortalecer las políticas que promuevan la innovación en tecnologías energéticas apropiadas para el contexto colombiano. Esto incluye el desarrollo de sistemas de monitoreo, almacenamiento de energía, microrredes y otras soluciones adaptadas a las necesidades de las comunidades rurales.

CONCLUSIONES

La energía solar fotovoltaica representa una solución clave para las Zonas No Interconectadas (ZNI). Dada la limitada infraestructura eléctrica y las dificultades geográficas que presentan las ZNI, los sistemas solares fotovoltaicos (SFV), especialmente los aislados y los híbridos, se consolidan como una alternativa viable, autónoma y ambientalmente sostenible para brindar acceso energético a comunidades rurales marginadas.

El sector fotovoltaico en Colombia aún enfrenta obstáculos estructurales. Aunque el país ha mostrado avances en la implementación de sistemas solares conectados a la red y aislados, persisten barreras significativas como la falta de incentivos claros, dificultades en la gestión de subsidios, corrupción, y escaso conocimiento técnico en las comunidades beneficiarias.

Los sistemas SFV generan impactos positivos multisectoriales. La instalación de sistemas solares ha demostrado mejorar la calidad de vida en las zonas rurales mediante acceso a educación, salud, conectividad, y actividades productivas, además de contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la protección de los ecosistemas locales.

El análisis de casos demuestra la factibilidad técnica y financiera de estos proyectos, con tiempos de retorno aceptables y un potencial significativo de replicabilidad en otras regiones del país.

Persisten barreras institucionales, regulatorias y de gobernanza que afectan la sostenibilidad de estos proyectos. La falta de coordinación interinstitucional, los trámites complejos y la ausencia de acompañamiento técnico en comunidades limitan su escalabilidad.

Se requiere un enfoque de transición energética justa, que integre a las comunidades en la toma de decisiones, promueva modelos de gestión colectiva y asegure mecanismos de evaluación participativa del impacto de los proyectos.

RECOMENDACIONES

- Fortalecer los marcos regulatorios y financieros para la expansión de sistemas SFV en zonas rurales
- Se recomienda una revisión y simplificación de los trámites, así como la creación de políticas claras e incentivos fiscales o subsidios estables que impulsen tanto la inversión privada como pública en sistemas solares en las ZNI.
- Promover procesos de capacitación técnica y apropiación comunitaria
- Es fundamental diseñar programas de formación para operadores locales y usuarios, que incluyan mantenimiento, gestión de sistemas y eficiencia energética, asegurando así la sostenibilidad técnica y social de los proyectos implementados.
- Implementar programas de formación técnica y apropiación comunitaria, especialmente en mantenimiento, gestión de energía y sostenibilidad, para asegurar el empoderamiento local y la autonomía energética.
- Establecer mecanismos de financiamiento adaptados a contextos rurales, como tarifas diferenciadas, subsidios dirigidos, microcréditos o fondos rotatorios gestionados por cooperativas locales.
- Fomentar modelos asociativos de gestión de la energía, como cooperativas energéticas o juntas comunitarias, que fortalezcan la participación, transparencia y sostenibilidad de los sistemas solares.
- Apoyar la innovación tecnológica y la adecuación cultural de los sistemas solares, mediante convocatorias nacionales de I+D enfocadas en microredes, almacenamiento de energía, dispositivos autónomos y soluciones adaptadas a zonas con diversidad ecológica y cultural.
- Promover la articulación interinstitucional entre entidades como el Minenergía, UPME, IPSE, CAR y entes territoriales para garantizar la implementación coherente de políticas energéticas en las regiones más aisladas.

REFERENCIAS

- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (13 de mayo de 2022). *Mamíferos de la Ecoreserva Campo Rubiales (Puerto Gaitán, Meta) - Proyecto FIBRAS*. Obtenido de Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt: https://www.gbif.org/es/dataset/c1ce5fab-e32e-4251-bd0d-b4cf4a0fb76d?utm_source
- 2010 Solar Technologies. (2011). Obtenido de 2010 Solar Technologies: <https://docs.nrel.gov/docs/fy12osti/51847.pdf>
- 4°13'04.8"N 72°01'19.6"W MAPS. (s.f). *4°13'04.8"N 72°01'19.6"W*. Obtenido de MAPS: https://www.google.com/maps/place/4%C2%B013'04.8%22N+72%C2%B001'19.6%22W/@4.4444208,-73.0047458,2218509m/data=!3m1!1e3!4m4!3m3!8m2!3d4.218!4d-72.0221?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDUxMy4xIKXMDS0JLDEwMjExNDUzSAFQA%3D%3D
- 8°04'54.1"N 76°51'24.1"W MAPS. (s.f). *8°04'54.1"N 76°51'24.1"W*. Obtenido de Google Maps: https://www.google.com/maps/place/8%C2%B004'54.1%22N+76%C2%B051'24.1%22W/@6.0309418,-69.6529706,2212884m/data=!3m1!1e3!4m4!3m3!8m2!3d8.08169!4d-76.85669?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDUxMy4xIKXMDS0JLDEwMjExNDUzSAFQA%3D%3D
- Acción Solar Energy. (s.f). *Acción Solar Energy*. Obtenido de Beneficios de la energía solar en comunidades rurales: <https://accion-solar.org/beneficios-de-la-energia-solar-en-comunidades-rurales>
- Arango Sánchez, L. B. (1 de Enero de 2019). *Diversidad de peces en hábitats estuarinos delta del río Atrato, golfo de Urabá*. Obtenido de Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural, 23(1): <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/boletincientifico/article/view/2620>
- BID Invest. (Abril de 2021). *Resumen de la Revisión Ambiental y Social (ESRS) Bosques Solares Los Llanos - Colombia*. Obtenido de BID Invest: <https://idbinvest.org/en/download/13218>
- CEIBA. (7 de enero de 2022). *Especies de Flora Identificadas en el Zonoecotono Microcuenca Alta Río Tillavá, Vereda Rubiales Municipio de Puerto Gaitán Departamento del Meta*. Obtenido de CEIBA: https://i2d.humboldt.org.co/ceiba/resource.do?r=especies_flora_cuenca_alta_riotillava&utm_source
- CREG. (1998). *CREG*. Obtenido de CREG 070 de 1998: Gestor Normativo de la CRA - Resolución 70 de 1998 CREG

- CREG. (2021). *CREG*. Obtenido de CREG 174 de 2021: Alejandría - Resolución 174 de 2021 CREG
- Domínguez del Valle, J. (5 de mayo de 2020). *Los impactos de la energía solar sobre la biodiversidad*. Obtenido de Comunidad ISM. : ww.comunidadism.es/los-impactos-de-la-energia-solar-sobre-la-biodiversidad/
- e3asesorias. (s.f). *Catálogo de especies de aves y veces de Bocas del Atrato*. Obtenido de e3asesorias: <https://e3asesorias.com/publicaciones/catalogo-de-especies-de-aves-y-veces-de-bocas-del-atrato/>
- GHG Protocol. (s.f.). *Herramientas de cálculo y orientación*. Obtenido de Herramientas de cálculo y orientación: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance>
- Golden Energy SAS. (8 de enero de 2025). *Golden Energy SAS*. Obtenido de El impacto social de la energía solar en Colombia: <https://goldenenergysas.com/2025/01/08/el-impacto-social-de-la-energia-solar-en-colombia/>
- Green, M. (2001). *Photovoltaics: Technology overview*. *Energy Policy*, 29(9), 747–758. . Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00135-8)
- IPSE. (2023). *IPSE*. Obtenido de Caracterización Energética de las ZNI: <https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-de-las-zni/>
- IRENA. (2020). *IRENA*. Obtenido de Innovation landscape brief: Solar PV: <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Innovation-landscape-brief-Solar-PV>
- ISO 14064-2. (2019). *ISO*. Obtenido de ISO: <https://www.iso.org/standard/66454.html>
- ISO 50001. (2018). *ISO*. Obtenido de ISO: <https://www.iso.org/standard/69426.html>
- Krummenauer, L. (2 de marzo de 2016). *LinkedIn*. Obtenido de Sistema de geração de energia solar residencial interligados à rede : [https://www.linkedin.com/pulse/sistema-de-gera%C3%A7%C3%A3o-energia-solar-residencial-rede-krummenauer/:contentReference\[oaicite:2\]{index=2}](https://www.linkedin.com/pulse/sistema-de-gera%C3%A7%C3%A3o-energia-solar-residencial-rede-krummenauer/:contentReference[oaicite:2]{index=2})
- León, O. A.-D.-P.-V. (2023). *Explorando la biodiversidad de Campo Rubiales – PETAECUENEJABA URRUBIALE IRRAJABATA*. Obtenido de Patrimonio Natural y Ecopetrol: https://patrimonionatural.org.co/documento/explorando-la-biodiversidad-de-campo-rubiales-petaecuenajaba-urrubiale-irrajabata/?utm_source
- Luque, A., & Hegedus, S. (. (2011). *WILEY*. Obtenido de Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons.: <https://www.wiley.com/en-us/Handbook+of+Photovoltaic+Science+and+Engineering%2C+2nd+Edition-p-9780470721698>
- Luque, A., & Hegedus, S. (Enero de 2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd Edition*. Obtenido de Wiley: <https://www.wiley.com/en->

us/Handbook+of+Photovoltaic+Science+and+Engineering%2C+2nd+Edition-p-9780470721698

MAPS 13°21'00.0"N 81°22'12.0"W. (s.f). *13°21'00.0"N 81°22'12.0"W*. Obtenido de Google MAPS:

https://www.google.com/maps/place/13%C2%B021'00.0%22N+81%C2%B022'12.0%22W/@13.358993,-81.3728157,10057m/data=!3m1!1e3!4m4!3m3!8m2!3d13.35!4d-81.37?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDUxMy4xIKXMDS0JLDEwMjExNDUzSAFQAw%3D%3D

Minenergia. (s.f). *Minenergia*. Obtenido de Entró en operación la central híbrida de Miraflores, Guaviare, que por primera vez permite el servicio de energía 24/7: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/entr%C3%B3-en-operaci%C3%B3n-la-central-h%C3%ADbrida-de-miraflores-guaviare-que-por-primera-vez-permite-el-servicio-de-energ%C3%ADa-247/>

Minenergía. (s.f). *Minenergía*. Obtenido de Instalación de sistemas solares fotovoltaicos individuales en zonas no interconectadas. Proyectos tipo: <https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/Celdas/DocumentoMetodologicoPTIPOCELDASSOLARES.pdf>

Mousa, A. (2020). Obtenido de Review of hybrid renewable energy systems for rural electrification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110275. : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110275>

Planas, A., Quintero, J., & Montealegre, L. (2021). *Banco Interamericano de Desarrollo*. Obtenido de Guía ambiental y social para proyectos de generación fotovoltaicos e híbridos menores o iguales a 1 MW: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>

Prensa Instituto Humboldt. (18 de enero de 2021). *La biodiversidad de Providencia renace luego del paso del huracán Iota*. Obtenido de Instituto Humboldt: https://www.humboldt.org.co/noticias/la-biodiversidad-de-providencia-renace-luego-del-paso-del-huracan-iota?utm_source

R.C, A. (8 de julio de 2024). *Despliegue de la energía solar respetando la biodiversidad*. Obtenido de ECOTicias.com el Periódico Verde: <https://www.ecoticias.com/energias-renovables/energia-solar-biodiversidad>

Ramos-Torres, D., & Esqueda, L. F.-B. (2017). *AMPHIBIANS and REPTILES of Tillavá, Puerto Gaitán Meta-Colombia*. Obtenido de Universidad Distrital Francisco José de Caldas: https://fieldguides.fieldmuseum.org/sites/default/files/rapid-color-guides-pdfs/909_colombia_amphibians_and_reptiles_of_tillava.pdf?utm_source=chatgpt.com

- Reserva de Biosfera Seaflower. (s.f). *San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Reserva Mundial de la Biósfera “Seaflower”. Ambiente, cultura y desarrollo en armonía.* Obtenido de Reserva de Biosfera Seaflower: <https://www.sanandresyprovidencia.com/reserva-de-biosfera-seaflower>
- SIB. (2023). *Cladóceros de la laguna La Española, Puerto Gaitán, Meta, Colombia.* Obtenido de SIB Colombia: https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=ullanos_cladoceros-lagunaespanola&request_locale=fr&utm_source
- SIB. (26 de abril de 2023). *Estudio de Impacto Ambiental parque solar fotovoltaico Wimke.* Obtenido de SIB Colombia: https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=284_wimke_20171002
- SIB. (26 de abril de 2023). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Solar Bosques Solares de los Llanos 6 (79,6 MW) y su Conexión a la Subestación Santa Helena 115 kV.* Obtenido de SIB Colombia: https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=2155_solares_2021
- SIB. (27 de noviembre de 2024). *Biodiversidad asociada al proyecto Parque Solar Fovoltaico Tepuy.* Obtenido de SIB Colombia: https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=epm_tepuy&request_locale
- SIB. (12 de septiembre de 2024). *Estudio de Impacto Ambiental para el proyecto Atlántico Photovoltaic 199.5MW.* Obtenido de SIB Colombia: https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=eia_atlantico_photovoltaic&utm_source
- SIB. (1 de Enero de 2024). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA EL PROYECTO PARQUE SOLAR FV REFISOL 99 MW.* Obtenido de SIB Colombia: https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=eia_parque_solar
- Solinc. (s.f). *Solinc.* Obtenido de Ilustración de sistema solar aislado: <https://solinc.com.mx/blog/panel-solar/tipos-de-paneles-solares-dibujos/>
- SunFields Europe. (s.f). *SunFields Europe.* Obtenido de Autoconsumo fotovoltaicos [Imagen]: [https://www.sfe-solar.com/noticias/autoconsumo/autoconsumo-fotovoltaico/:contentReference\[oaicite:2\]{index=2}](https://www.sfe-solar.com/noticias/autoconsumo/autoconsumo-fotovoltaico/:contentReference[oaicite:2]{index=2})
- TC proyectos y consultorías. (Julio de 2021). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL. PROYECTO PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA “PV LA MATA” 80 MW Y SU LÍNEA DE CONEXIÓN.* Obtenido de BID Invest: https://www.idbinvest.org/sites/default/files/2022-04/La%20Mata%20-%20Estudio%20de%20Impacto%20Ambienta%20%28EIA%29%20-%20%20Resumen%20Ejecutivo.pdf?utm_source
- UPME. (s.f.). Obtenido de UPME: <https://www1.upme.gov.co/>

UPME. (2021). *FACTOR DE EMISIONES DE LA RED DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA*. Obtenido de UPME: https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_Cartilla_Factor_de_emision_2021.pdf

What is the energy payback for PV? (2004). Obtenido de U.S. Department of Energy: <https://docs.nrel.gov/docs/fy04osti/35489.pdf>

World bank. (2018). *World bank*. Obtenido de Off-Grid Solar Market Trends Report: <https://www.lightingglobal.org/resource/2018-off-grid-solar-market-trends-report/>

XM. (2 de Agosto de 2024). *XM*. Obtenido de XM: <https://www.xm.com.co/noticias/7028-en-el-primer-semester-del-2024-con-el-ingreso-de-40-proyectos-nuevos-se-fortalece-la#>

Yangambi . (s.f). *Yangambi* . Obtenido de Imagen de parque solar: https://www.yangambi.org/wp-content/uploads/2021/01/AXF_SOLARPARK_1120_03.jpg

ANEXOS

ANEXO 1. Datos sistemas solares fotovoltaicos en Colombia

En el presente anexo, se adjuntan las tablas base para realizar las gráficas correspondientes a la sección del contexto actual de los sistemas solares fotovoltaicos en Colombia. Estos datos se obtuvieron del Ministerio de Ambiente y XM.

Tabla 18. Clasificación de los SFV conectado a la red

CLASIFICACIÓN	CANTIDAD
Normal	73
Autogenerador	52
Gen. Distribuida	41
Autog Peq. Escala	3

Tabla 19. Cantidad de SFV conectados a la red instalados por departamento

DEPARTAMENTO	CANTIDAD
Valle del Cauca	38
Tolima	25
Córdoba	16
César	14
Atlántico	13
Meta	9
Cundinamarca	9
Sucre	7
Huila	6
Antioquia	6
Bolívar	5
Magdalena	4
Cauca	4
Norte de Santander	3
Nariño	2
Caldas	2
Casanare	2
La Guajira	2
Santander	1
Risaralda	1

Tabla 20. Estado del recurso de los SFV

ESTADO	CANTIDAD
Operación	98

Pruebas	65
Inactivo	6

Tabla 21. Diez agentes representantes en el sector energético en Colombia

AGENTE	CANTIDAD
CELSIA COLOMBIA S.A. E.S.P.	56
ERCO GENERACION S.A.S. ESP	19
UNERGY ENERGY DIGITAL S.A.S E.S.P	14
ISAGEN S.A. E.S.P.	10
GREENYELLOW COMERCIALIZADORA S.A.S. E.S.P.	9
EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN E.S.P.	9
ENEL COLOMBIA SA ESP	8
GENERADORA Y COMERCIALIZADORA DE ENERGIA DEL CARIBE S.A. E.S.P.	6
ATLÁNTICA COLOMBIA S.A.S. E.S.P.	5
ENERGIA Y GAS DE COLOMBIA SAS ESP	4

Tabla 22. Capacidad instalada en diez departamentos

DEPARTAMENTO	CAPACIDAD [MW]
Atlántico	553,262
Cesar	320,134
Valle del Cauca	223,5818
Córdoba	210,57
Caldas	185
Tolima	167,74
Meta	140,5
Magdalena	120,52
Sucre	71,1879
Cundinamarca	56,7

Tabla 23. Capacidad instalada por departamento SFV aislado

DEPARTAMENTO	CAPACIDAD INSTALADA (KWP)
Vichada	5149
Guaviare	721,025
Guajira	600
Chocó	446
Guainía	220,31
Bolívar	150
Vaupés	0

ANEXO 2. Procedimiento para el cálculo de la huella de carbono

1. CÁLCULO HUELLA DE CARBONO GRANJA SOLAR BOSQUE SOLAR LOS LLANOS

Tabla 24. Parámetros generales SFV On Grid

PARÁMETRO	VALOR ESTIMADO
Capacidad instalada	200 MWp
Factor de planta	20% (0.20)
Vida útil del proyecto	25 años
Generación anual estimada	350 GWh/año
Generación total en 25 años	8.750.000 MWh
Intensidad de emisiones (ciclo de vida)	30 a 50 gCO ₂ e/kWh
Emisiones evitadas por generación solar	Se evita generación con diésel
Irradiación anual	2.000 kWh/m ²

ETAPA 1. DEFINIR LOS LÍMITES DEL PROYECTO

Límites organizacionales

Proyecto operado por entidad pública (UPME/ICETEX o entidades locales). Se incluyen todas las actividades bajo control operativo directo.

Límites temporales

- Vida útil estimada: 25 años
- Periodo de análisis: anual y acumulado (25 años)

Límites operacionales

Tabla 25. Límites operacionales SFV On Grid

FUENTE	ETAPA	TIPO
Combustión de diésel en maquinaria	Instalación	Directa
Transporte de materiales	Instalación	Indirecta
Fabricación de componentes	Pre-operación	Indirecta
Electricidad para oficinas	Operación	Indirecta
Vehículos de vigilancia	Operación	Directa
Transporte de empleados	Operación	Indirecta
Mantenimiento eléctrico	Operación	Directa
Fin de vida útil (desmantelamiento)	Disposición	Indirecta

ETAPA 2. LÍNEA BASE DE EMISIONES

Según datos del IPCC y UPME Colombia, el factor promedio de emisión para plantas diésel es:

0.80–0.90 toneladas de CO₂e por MWh generado

Tabla 26. Línea base de emisiones SFV On Grid

MÉTRICA	ESCENARIO BAJO	ESCENARIO ALTO
Emisiones generadas por planta diésel por año	280.000 TonCO ₂ eq	315.000 TonCO ₂ eq
Emisiones generadas por planta diésel en 25 años	7.000.000 TonCO ₂ eq	7.875.000 TonCO ₂ eq

ETAPA 3. EMISIONES DEL PROYECTO

Tabla 27. Emisiones SFV On Grid

FASE	ESCENARIO BAJO [Ton CO ₂ eq] 30 gCO ₂ e/kWh	ESCENARIO ALTO [Ton CO ₂ eq] 50 gCO ₂ e/kWh
Fabricación	186.375 TonCO ₂ eq	310.625 TonCO ₂ eq
Transporte	23.625 TonCO ₂ eq	39.375 TonCO ₂ eq
Instalación	2.625 TonCO ₂ eq	4.375 TonCO ₂ eq
Operación y mantenimiento	47.250 TonCO ₂ eq	78.750 TonCO ₂ eq
Disposición final	2.625 TonCO ₂ eq	4.375 TonCO ₂ eq
Total	262.500 Ton CO₂eq	437.500 Ton CO₂eq

ETAPA 4. REDUCCIÓN NETA DE EMISIONES

Tabla 28. Reducciones netas de emisiones SFV On Grid

MÉTRICA		EMISIONES PLANTA DIÉSEL	EMISIONES DEL PROYECTO	REDUCCIÓN NETA
ESCENARIO BAJO	Emisiones evitadas por año	280.000 TonCO ₂ eq	262.500 TonCO ₂ eq	17.500 TonCO ₂ eq
ESCENARIO ALTO	Emisiones evitadas por año	315.000 TonCO ₂ eq	437.500 TonCO ₂ eq	-122.500 TonCO ₂ eq

ETAPA 5. VERIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Performance Ratio (PR) = Energía real / Energía teórica

$$PR = (350.000.000 / 200.000 \times 2.000) \times 100$$

PR= 87.5%

2. CÁLCULO HUELLA DE CARBONO SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO BOCAS DEL ATRATO

PARÁMETROS GENERAL DEL PROYECTO

- Capacidad solar instalada: 1 MWp
- Factor de planta: 17%
- Energía solar generada: 1.489 MWh/año
- Sistema desconectado de la red nacional. Antes: generación total con diésel
- Irradiación anual: 1.750 kWh/m²

ETAPA 1. DEFINIR LOS LÍMITES DEL PROYECTO

Límites organizacionales

Proyecto operado por entidad pública (UPME/ICETEX o entidades locales). Se incluyen todas las actividades bajo control operativo directo.

Límites temporales

- Vida útil estimada: 25 años
- Periodo de análisis: anual y acumulado (25 años)

Límites operacionales

Tabla 29. Límites operacionales SFV Off Grid

FUENTE	ETAPA	TIPO
Combustión de diésel en maquinaria	Instalación	Directa
Transporte de materiales	Instalación	Indirecta
Fabricación de componentes	Pre-operación	Indirecta
Electricidad para oficinas	Operación	Indirecta
Vehículos de vigilancia	Operación	Directa
Transporte de empleados	Operación	Indirecta
Mantenimiento eléctrico	Operación	Directa
Fin de vida útil (desmantelamiento)	Disposición	Indirecta

ETAPA 2. LÍNEA BASE DE EMISIONES

Factores de emisión diésel: 0.80 - 0.90 tCO₂e/MWh

Emisiones evitadas
 - Escenario bajo: $1.489 \times 0.80 = 1.191$ TonCO₂eq
 - Escenario alto: $1.489 \times 0.90 = 1.340$ TonCO₂eq

ETAPA 3. EMISIONES DEL PROYECTO

Tabla 30. Emisiones SFV Off Grid

FASE	ESCENARIO BAJO [Ton CO ₂ eq] 30 gCO ₂ e/kWh	ESCENARIO ALTO [Ton CO ₂ eq] 50 gCO ₂ e/kWh
Fabricación	840	1.400
Transporte	106	177
Instalación	12	20
Operación y mantenimiento	213	355
Disposición final	12	20
TOTAL	1.183	1.972

ETAPA 4. REDUCCIÓN NETA DE EMISIONES

Tabla 31. Reducciones netas de emisiones SFV Off Grid

MÉTRICA		EMISIONES PLANTA DIÉSEL	EMISIONES DEL PROYECTO	REDUCCIÓN NETA
ESCENARIO BAJO	Emisiones evitadas por año	1.191 TonCO ₂ eq	1.183 TonCO ₂ eq	8 TonCO ₂ eq
ESCENARIO ALTO	Emisiones evitadas por año	1.340 TonCO ₂ eq	1.972 TonCO ₂ eq	-632 TonCO ₂ eq

ETAPA 5. PERFORMANCE RATIO (PR)

$$PR = \left(\frac{\text{Energía real}}{\text{Energía teórica}} \right) \times 100$$

$$PR = (1.489.000 / (1.000 \times 1.750)) \times 100 = \mathbf{85.1\%}$$

$$PR = \mathbf{85.1\%}$$

3. CÁLCULO HUELLA DE CARBONO SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-DIÉSEL ISLA DE PROVIDENCIA**PARÁMETROS GENERALES DEL PROYECTO**

- Capacidad solar instalada: 3 MWp.
- Factor de planta: 18%
- Energía solar generada: 4.730 MWh/año
- Energía total demandada en la isla: 11.000 MWh/año (estimado)
- Porcentaje de cobertura solar: 43%
- Irradiación anual: 1.750 kWh/m²

ETAPA 1. DEFINICIÓN DE LOS LÍMITES DEL PROYECTO**Límites organizacionales**

Proyecto operado por entidad pública (UPME/ICETEX o entidades locales). Se incluyen todas las actividades bajo control operativo directo.

Límites temporales

- Vida útil estimada: 25 años
- Periodo de análisis: anual y acumulado (25 años)

Límites operacionales

Tabla 32. Límites operacionales SFV Híbrido

FUENTE	ETAPA	TIPO
Combustión de diésel en maquinaria	Instalación	Directa
Transporte de materiales	Instalación	Indirecta
Fabricación de componentes	Pre-operación	Indirecta
Electricidad para oficinas	Operación	Indirecta
Vehículos de vigilancia	Operación	Directa

Transporte de empleados	Operación	Indirecta
Mantenimiento eléctrico	Operación	Directa
Fin de vida útil (desmantelamiento)	Disposición	Indirecta

ETAPA 2. LÍNEA BASE DE EMISIONES

Factores de emisión diésel: 0.80 - 0.90 tCO₂e/MWh

Emisiones		evitadas				anualmente:	
-	Escenario bajo:	4.730	x	0.80	=	3.784	Ton CO ₂ eq
-	Escenario alto:	4.730	x	0.90	=	4.257	Ton CO ₂ eq

ETAPA 3. EMISIONES DEL PROYECTO

Tabla 33. Emisiones SFV Híbrido

FASE	ESCENARIO BAJO [Ton CO ₂ eq] 30 gCO ₂ e/kWh	ESCENARIO ALTO [Ton CO ₂ eq] 50 gCO ₂ e/kWh
Fabricación	2.520	4.200
Transporte	319	532
Instalación	35	58
Operación y mantenimiento	639	1.065
Disposición final	35	58
Total	3.548	5.913

ETAPA 4. REDUCCIÓN NETA DE EMISIONES

Tabla 34. Reducciones netas de emisiones SFV Híbrido

MÉTRICA		EMISIONES PLANTA DIÉSEL	EMISIONES DEL PROYECTO	REDUCCIÓN NETA
ESCENARIO BAJO	Emisiones evitadas por año	3.784 TonCO ₂ eq	3.548 TonCO ₂ eq	0.236 TonCO ₂ eq
ESCENARIO ALTO	Emisiones evitadas por año	4.257 TonCO ₂ eq	5.913 TonCO ₂ eq	-1.656 TonCO ₂ eq

ETAPA 5. PERFORMANCE RATIO (PR)

PR = (Energía real / Energía teórica) x 100

$$PR = (4.730.000 / (3.000 \times 1.750)) \times 100 = 90.0\%$$

PR=90.0%