



¿La implementación de la tecnología de energía fotovoltaica en Colombia conduce al desarrollo energético sostenible?

Lidia Yaneth Neita Duarte
Wilson Alonso Restrepo Flórez

Monografía de especialización presentada para optar al título de Magíster en Sostenibilidad

Directora
Erika Arenas Castiblanco, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Ingenierías
Maestría en Sostenibilidad
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

¿La implementación de la tecnología de energía fotovoltaica en Colombia conduce al desarrollo energético sostenible? 2

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Dedicatoria

A Dios quien nos ha dado la oportunidad de vivir esta experiencia llamada vida y ha guiado nuestros pasos en este caminar.

Al trabajo y consistencia que hemos desarrollado a lo largo de este hermoso aprendizaje que cada día nos permite entender que al empezar a pesar de los momentos en los que se ha querido renunciar las ganas y ese sentir interno nos ayuda a retomar lo académico, que permite alcanzar este logro.

A nuestras familias, amigas y amigos, que han sabido entender y brindar el apoyo necesario en los momentos duros y el reír y sentir el aliento de la satisfacción cuando nos han visto retomar nuestro camino al que se buscar con este artículo, a ellos de igual forma por valiosa compañía, sus palabras y sus acciones las cuales nos enseñaron fortaleza.

Ya todas las personas que, directa e indirectamente, han contribuido a que este nuevo sueño se hiciera realidad.

Lidia Y. Neita Duarte y Wilson Restrepo Flórez

Agradecimientos

A nuestros docentes, en especial a la Dra Erika Arenas Castiblanco, quien tuvo la sabiduría y en entendimiento de guiarnos en los momentos que por deferentes circunstancias no encontrábamos claridad en el camino de la investigación.

A nuestras familias, amigos, compañeros de trabajo y jefes, quienes nos brindaron apoyo a lo largo de todo el proceso y palabras de aliento cuando fueron necesarias.

Tabla de contenido

| | |
|------------------------------------|-----|
| Resumen | 10 |
| Abstract | 11 |
| Introducción | 12 |
| 1 Planteamiento del problema | 13 |
| 1.1 Antecedentes | 15 |
| 2 Justificación..... | 27 |
| 3 Objetivos | 29 |
| 3.1 Objetivo general | 29 |
| 3.2 Objetivos específicos..... | 29 |
| 4 Marco teórico | 30 |
| 4.1 Marco conceptual | 30 |
| 5 Metodología | 37 |
| 6 Revisión de la literatura..... | 38 |
| 6.1 Contexto internacional | 38 |
| 6.2 Contexto Colombiano | 65 |
| 7 Resultados y Discusión | 78 |
| 8 Conclusiones | 92 |
| 9 Recomendaciones..... | 94 |
| Referencias | 96 |
| Anexos..... | 106 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Impactos de la energía fotovoltaica montada en el suelo en los servicios ecosistémicos. | 19 |
| Tabla 2 Resumen de la pérdida de hábitat por desarrollo solar y los efectos de barrera para los Antilocapra americana residentes y migratorios en suroeste de Wyoming 2018-2020 | 21 |
| Tabla 3 Los 10 parques solares más grandes del mundo en 2021 | 24 |
| Tabla 4 Resumen de la normatividad | 35 |
| Tabla 5 Metas e indicadores del ODS 7 Energía asequible y no contaminante | 40 |
| Tabla 6 Indicadores priorizados del ODS7 por el CEA-CEPAL en el 2018 | 41 |
| Tabla 7 Resumen de los indicadores ambientales, económicos, sociales. | 45 |
| Tabla 8 Indicadores de evaluación de sustentabilidad del sistema energético mexicano | 48 |
| Tabla 9 Método de obtención para los indicadores Desarrollo Energético Sustentable del estado de Quintana Roo, México | 50 |
| Tabla 10 Niveles de sostenibilidad de los sistemas de microrredes en el estado Rondônia | 51 |
| Tabla 11 Parámetros clave de la planta fotovoltaica estándar de 3Wp prediseñada para aplicaciones domésticas. | 55 |
| Tabla 12 Resumen de los indicadores evaluados en el estudio de un sistema FV residencial de 3 kW | 55 |
| Tabla 13 Tecnologías evaluadas | 57 |
| Tabla 14 Minerales para acumular energía, reservas por países. 2023 | 59 |
| Tabla 15 Resumen de los obstáculos para el reciclaje de módulos fotovoltaicos. | 60 |
| Tabla 16 Plantas de generación de energía eléctrica. | 66 |
| Tabla 17 Matriz eléctrica ZNI | 69 |
| Tabla 18. Indicadores energéticos UPME | 71 |
| Tabla 19 Indicadores seleccionados para el modelo geoestadístico multicriterio. | 73 |
| Tabla 20 Resumen de los grupos de indicadores identificados para el SED | 79 |
| Tabla 21 Indicadores económicos propuestos. | 89 |
| Tabla 22 Indicadores sociales propuestos para ZNI | 90 |

| | |
|--|----|
| Tabla 23 Indicadores sociales propuestos para SIN..... | 91 |
| Tabla 24 Indicadores ambientales propuestos..... | 91 |

Lista de figuras

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Esquema de reciclaje de materiales para la fabricación de baterías. | 23 |
| Figura 2 | Bhadla Solar Park | 25 |
| Figura 3 | Pavagada Solar Park | 25 |
| Figura 4 | Parque Solar Castilla..... | 26 |
| Figura 5 | Ecoparque San Fernando | 26 |
| Figura 6 | Esquema básico de funcionamiento del sistema fotovoltaico | 30 |
| Figura 7 | Proyectos que entrarán en operación en 2023 | 68 |
| Figura 8 | Mapa los proyectos de cogeneración en las ZNI de Colombia..... | 69 |
| Figura 9 | Capacidad de proyectos solares vigentes (MW)..... | 77 |
| Figura 10 | Ubicación de los principales proyectos solares vigentes | 85 |
| Figura 11 | Fases del ciclo de vida de una planta solar conectada a la red y fuera de la red | 86 |

Siglas, acrónimos y abreviaturas

| | |
|--------------|--|
| ACV | Análisis del Ciclo de Vida |
| APA | American Psychological Association |
| CEPAL | Comisión Económica para América Latina y el Caribe |
| EPBT | Tiempo de recuperación de la energía |
| ER | Energías Renovables |
| GEI | Gases de efecto invernadero |
| GM-PV | Energía Fotovoltaica Montada en el Suelo |
| IEDS | Indicadores Energéticos del Desarrollo Sostenible |
| ODS | Objetivos de Desarrollo Sostenible |
| OIEA | Organismo Internacional de Energía Atómica |
| SE | Servicios Ecosistémicos |
| SED | Desarrollo Energético Sostenible |
| UPB | Universidad Pontificia Bolivariana |
| USSE | Desarrollo de la Energía Solar a Gran Escala |

Resumen

El desarrollo energético sostenible es un tema de interés mundial por las emisiones de GEI provenientes de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, su importancia en el impulso de las economías de los países, el aumento de la demanda de electricidad a nivel mundial y el impacto del acceso a la energía en la salud, la educación, las comunicaciones, el transporte entre otros se traducen en beneficios sociales, económicos y ambientales objetivos de la sostenibilidad. La importancia de este sistema se encuentra plasmado en el ODS 7 “Energía asequible y no contaminante”. Colombia en sus compromisos sobre el cambio climático y buscando la seguridad energética del país ha diversificado la matriz energética fortaleciendo la generación de energía de fuentes no convencionales renovables especialmente la energía solar, realizando grandes inversiones y esfuerzos en la implementación de esta tecnología en el país. Por este, motivo es importante analizar si esta tecnología contribuye al desarrollo sostenible del país.

Por lo anterior, se necesita realizar una revisión del contexto internacional sobre la tecnología solar, los conjuntos de indicadores para medir el progreso hacia el desarrollo sostenible de la energía y cuales permiten el monitoreo del progreso para la toma de decisiones y desarrollo de las políticas. Este trabajo tiene como propósito proporcionar una lista de indicadores de sostenibilidad obtenidos de una revisión de experiencias internacionales que podrían ser empleados en Colombia como medidores del desarrollo sostenible y de los aspectos relevantes en la implementación de la energía solar.

Palabras clave: Colombia, indicadores, parques solares, desarrollo energético sostenible, políticas energéticas.

Abstract

Sustainable energy development is a topic of global interest due to greenhouse gas emissions from the generation of electric power using fossil fuels, its importance in driving the economies of countries, the increasing global demand for electricity, and the impact of energy access on health, education, communications, transportation, among others, which translate into social, economic, and environmental benefits—objectives of sustainability. Because of the importance of this system, it is reflected in ODS 7 “Affordable and Clean Energy”. Colombia, in its commitments to climate change and seeking the country’s energy security in diversifying its energy matrix by strengthening the generation of energy from non-conventional renewable energy sources, especially solar energy, has made significant investments and efforts in implementing this technology in the country. For this reason, it is important to analyze whether this technology contributes to the country’s sustainable development.

Therefore, it is necessary to review the international context regarding solar technology, the sets of indicators to measure progress towards sustainable energy development, and which allow monitoring progress for decision-making and policy development. Thus, providing a list of indicators that could be employed in Colombia based on international experiences and which issues are relevant in the sustainability of the implementation of solar energy.

Keywords: Colombia, indicators, SED, solar parks, energy policies.

Introducción

El desarrollo energético sostenible SED es el enfoque integral para satisfacer las necesidades actuales de la energía de los países para garantizar un futuro próspero y equitativo y es fundamental para el logro de varios Objetivos del Desarrollo Sostenible. El SED incluye la reducción de las emisiones de GEI, el uso eficiente de la energía, la promoción de las energías renovables, el acceso al servicio de energía, la seguridad energética y económica, y la disminución de los impactos negativos asociados con la generación, distribución y consumo de la energía.

Puesto que es importante realizar seguimiento y control a las estrategias y políticas desarrolladas por los países para tener un sistema energético sostenible por medio de indicadores. Por lo anterior, diferentes organismos internacionales, regionales o nacionales han desarrollado grupos de indicadores que permitan realizar comparaciones, seguir el progreso, ajustar las estrategias, realizar mediciones objetivas y transparentes que lleven hacia un sistema energético más equitativo, limpio y eficiente.

A nivel mundial el aumento de las energías renovables ha sido considerable y Colombia no es ajena a esta realidad y ha desarrollado políticas y hojas de ruta que guían la transición energética y la implementación de nuevas tecnologías de generación que garanticen la seguridad y confiabilidad del servicio de energía, contribuyan a la mitigación del cambio climático, y al desarrollo económico del país. La principal tecnología empleada en el país para descarbonizar y diversificar su matriz energética es la fotovoltaica, por tal motivo es importante conocer si esta tecnología en el tiempo y en el contexto colombiano es sostenible y contribuye al cumplimiento de los compromisos internacionales asumidos por Colombia.

Por consiguiente, este trabajo se basa en la investigación de cuáles son los indicadores empleados a nivel internacional para la medición del SED, la revisión de los impactos positivos y negativos de la tecnología solar en las tres dimensiones de la sostenibilidad, conocer el contexto colombiano en cuanto a los objetivos, avances, políticas para el sector energético, en especial, los proyectos de energía solar para proponer un grupo de indicadores que podrían evaluar si la implementación a gran escala de la generación de energía solar contribuye al desarrollo energético sostenible de Colombia.

1 Planteamiento del problema

El consumo de los combustibles fósiles por parte del ser humano en los dos últimos siglos ha generado impactos globales negativos en la estabilidad planetaria, como el aumento de la temperatura a causa de la rápida acumulación de los gases de efecto invernadero; las Naciones Unidas en 2015, ha definido rutas para proteger el planeta, políticas determinadas a través de los diecisiete (17) Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El ODS13 acción por el clima, consiste en delimitar el aumento de la temperatura media global a 1,5 °C para esto se requiere disminuir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. En paralelo también se tiene el ODS 7 energía asequible y no contaminante. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2022), generando el impulso para la generación de energía eléctrica basado en la utilización del sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal.

La matriz energética mundial se encuentra distribuida de acuerdo con el informe Global Electricity Review de 2022, de la siguiente manera: carbón el 36%, gas 22%, otras fuentes fósiles 15%, hidroeléctrica 15%, energía solar y eólica 10% y otras fuentes limpias 13%.

La generación eléctrica por medio de la energía solar está calificada como una de las energías limpias y renovables, con una mayor participación en el mercado como reemplazo de los combustibles fósiles, aunque deben mantener altas tasas de crecimiento para alcanzar el ODS 13 y cubrir la demanda mundial de energía actual. (Ember,2022, p. 4-5).

De acuerdo con la International Renewable Energy Agency IRENA, la generación de energía solar renovable es uno de los sectores con mayor inversión en el año 2021, con cerca de doscientos cinco mil millones de dólares (US\$205.000.000.000) según el portal statista (2022). Estas inversiones se pueden evidenciar en la construcción de varios parques solares en el mundo. El parque solar más grande del mundo es el Bhadla Solar Park en India con una capacidad instalada de 2245 MWp con una superficie total de 5700 hectáreas en el desierto de Bhadla, Rajastán y contiene aproximadamente 10 millones de paneles solares. (National Geographic, 2021)

En América Latina la planta fotovoltaica más grande es la Planta solar Villanueva, ubicada en Viesca en el estado de Coahuila en México, con una capacidad de producción de 828MW. Cuenta con una extensión de 2400 hectáreas y se instalaron más de 2.3 millones de paneles solares. (Gobierno de México, 2018) y (KeeUI Solar, 2021)

De acuerdo con lo anterior, se evidencia la necesidad de construir grandes parques solares, para cubrir la demanda actual de energía y poder disminuir la generación con combustibles fósiles. Los parques requieren el uso de grandes extensiones de suelo, lo que conlleva a los gobiernos y comunidades, en establecer si cambian o no el uso de suelo con el ánimo de generar los espacios suficientes para la construcción de granjas para cubrir la demanda energética de una nación. Estas decisiones podrían terminar cambiando grandes extensiones de suelo, que hoy están siendo explotadas en agricultura, ganadería y otras actividades rurales. De igual forma, pueden generar implicaciones a nivel social como son desplazamiento y violencia por defender el territorio, a nivel económico como el cambio de las actividades como la ganadería, agricultura y a nivel ambiental como la deforestación y el aumento de la temperatura por el reflejo del sol en las placas solares, entre otros.

Adicional a la demanda de tierra, la generación solar fotovoltaica a gran escala requiere la instalación de varios de miles de paneles solares. La vida útil promedio de un panel solar está alrededor de 25 a 30 años con los mantenimientos adecuados. “Para el año 2050 se estima un cálculo de residuos de paneles entre 60 y 78 millones de toneladas. Actualmente, solo la Unión Europea ha adoptado regulaciones específicas en el campo del reciclaje. La mayoría de los países de todo el mundo los clasifican como basura o material industrial” (Periódico de Noticias de eficiencia energética y arquitectura [OVACEN], 2018). De igual forma, un estudio realizado por la Universidad Politécnica De València sobre la “Viabilidad técnica, económica y ambiental de una instalación fotovoltaica en un centro de asistencia sanitaria en Denia”, se determina que, los fabricantes estiman que, pasados los 20 años, la eficiencia es de un 80% respecto a su etapa inicial” (Olivert, 2022), por lo que hablar de una vida útil de 25 a 30 años es muy asertivo.

Con respecto a la producción de paneles solares, soportes, baterías y demás periféricos de un sistema fotovoltaico, estos requieren gran variedad de minerales y tierras raras como son el aluminio, cobre, silicio, cadmio, plata, litio, níquel, sodio, plomo, molibdeno, berilio, germanio, galio e indio, arsénico, telurio, cobalto, grafito, manganeso adicional a cemento y cables (Science for a changing world [USGS], 2019), (Palmetto Solar, 2022), (IM2 energía solar, 2014) y (Eliseo Sebastián energía solar, 2022).

La generación de energía eléctrica por la tecnológica fotovoltaica por lo expuesto anteriormente evidencia que la explotación de todos estos minerales se incrementa para construir todos los elementos necesarios para estos sistemas, fortaleciendo la industria minera, ocasionando

más dificultades sumadas a las ya indicadas de utilización y cambio de suelo para los parques solares puesto que sería necesario un cambio de suelo en exploración y explotación de estas materias primas a nivel mundial. Igualmente, la minería tiene cuestionamientos asociados a la sostenibilidad como son la financiación de conflictos violentos, contaminación, violación de derechos humanos entre otros. Esto conlleva a cuestionarse o plantearse la pregunta sobre la sostenibilidad en el proceso de la transición energética con la tecnología basada en la energía solar.

1.1 Antecedentes

Hernández et al. (2013) se centra en comprender las interacciones del desarrollo de la energía solar a gran escala (USSE) con los impactos ambientales a la biodiversidad, al uso de la tierra, a los recursos hídricos y la salud humana. Se reconocen los aspectos positivos como son la reducción de gases de efecto invernadero, estabilización de tierras degradadas, mayor independencia energética, oportunidades de empleo, aceleración de la electrificación rural y la mejora de la calidad de vida, la cual la hace atractiva en diversas regiones del mundo.

El estudio destaca los siguientes impactos ambientales, que pueden ocurrir en diferentes magnitudes a lo largo del ciclo de vida útil de la instalación: Construcción, operación y desmantelamiento de una planta de energía USSE.

Biodiversidad: USSE suelen eliminar la vegetación, aumentar las tasas de mortalidad de los organismos o servir como conductos para invasiones exóticas, que pueden extirpar competitivamente las especies nativas y puede producir la fragmentación del paisaje al crear barreras al movimiento de especies y sus genes. El uso de tóxicos ambientales y herbicidas pueden tener consecuencias potenciales a largo plazo para la diversidad local y regional.

Uso y consumo de agua: Dependiendo de la tecnología de USSE varía la tasa de extracción de agua y consumo de agua. La estrategia más común para la eliminación de polvo es el lavado de paneles. El desarrollo de proyectos USSE en regiones con limitaciones de agua como hábitats áridos o semiáridos pueden entrar en conflicto con otras actividades humanas como la agricultura, el uso doméstico, entre otros.

Erosión del suelo, transporte de sedimentos eólicos y retroalimentaciones a la eficiencia energética: las tierras áridas, donde a menudo se concentran estas instalaciones, son áreas donde

los fuertes vientos dan lugar al transporte eólico de arena y polvo donde es controlada en parte por la vegetación. Con la intervención para la instalación de la infraestructura de USSE se aumenta la pérdida del suelo por el viento y el agua. Existen estudios donde la reducción de la cubierta vegetal está relacionada con el aumento de la producción de polvo. La deposición de polvo puede incurrir en la disminución del rendimiento energético y las partículas transportadas pueden ser de composición variable que impactan la salud humana y el medio ambiente como la pérdida de biodiversidad y la recuperación de la vegetación

Salud humana y calidad del aire: Se plantean peligros para la calidad del aire como el aumento de partículas en suspensión, y contaminación de los depósitos de agua por las partículas o por derrames de materiales químicos necesarios en la operación. La liberación de patógenos transmitidos por el suelo, la contaminación del agua y en la fase de desmantelamiento la liberación de residuos industriales, y materiales tóxicos contenidos especialmente en los paneles solares. Otro factor, es el aumento de los incendios forestales por el cambio climático y el material de los paneles solares puede contribuir a la propagación del fuego y plantear riesgos a la vida y a la propiedad.

Impactos ecológicos de las líneas y corredores de transporte: las operaciones centralizadas de USSE requieren transmisión de la electricidad generada a los centros de población donde se produce consumo. La construcción de las redes de líneas de transmisión tan extensas tiene efectos ecológicos como el desplazamiento de la vida silvestre, la eliminación de la cubierta vegetal y la degradación de la calidad del hábitat. El impacto va a depender de las características de los sitios como la topografía, el tipo de vegetación, la ubicación, entre otros.

Cambio en el uso y la cubierta terrestre: el desarrollo de infraestructuras relacionada con la energía puede cambiar las características biofísicas de la tierra y el uso. Cuando se produce un cambio en el uso y la cubierta terrestre pueden liberar carbono a la atmósfera en forma de dióxido de carbono.

Dado que los sistemas energéticos pueden afectar a la tierra a través de la exploración de materiales, la extracción y adquisición de materiales, el procesamiento, la fabricación, la construcción, la producción, la operación y el mantenimiento, el refinamiento, la distribución, el desmantelamiento y la eliminación, las huellas energéticas pueden llegar a ser cada vez más altas.

La eficiencia en el uso de la tierra (por ejemplo, vatios por metro cuadrado, /m²) define la potencia de la instalación en relación con su huella que es el área de tierra transformada o impactada por la instalación a lo largo de la cadena de conversión completa del sistema energético. La

eficiencia del uso de la tierra de USSE está determinada por el diseño arquitectónico y de infraestructura y la capacidad de la planta de energía, pero indirectamente influenciada por la geografía del proyecto, el factor de capacidad, el tipo de tecnología y las prioridades del desarrollador. Hasta la fecha, ningún estudio ha evaluado cómo la eficiencia del uso de la tierra de USSE (W/m²) y el diseño pueden afectar la recuperación o reversibilidad del ecosistema.

En términos de eficiencia en el uso de la tierra, los sistemas de energía fotovoltaica generan la mayor cantidad de energía por área entre las energías renovables, incluidas la eólica, la hidroeléctrica y la biomasa.

Otros puntos mencionados son: en la etapa de la construcción de estos proyectos hace cambios en la rugosidad de la superficie, es decir, que los paneles solares influyen en la dinámica del viento local y regional hasta a 300 km de distancia de acuerdo con estudios realizados.

Desde la perspectiva del público, los beneficios del desarrollo de la energía renovable deben sopesarse con la pérdida de la función ecológica, la pérdida de acceso público y la pérdida de recursos culturales irremplazables. Desde el punto de vista del desarrollo energético por sí solo, los posibles retrasos en la obtención de permisos y en las revisiones reglamentarias pueden considerarse como efectos negativos en los rendimientos financieros. En general, las políticas asociadas al desarrollo de los sistemas energéticos en todos los países aún no han abordado todos los impactos y externalidades clave.

Los autores enuncian formas de minimizar los impactos que incluyen: (1) comprender las implicaciones ambientales de las decisiones de ubicación utilizando inventarios adecuados de especies y proceso, (2) monetizar el valor real del capital natural y los servicios ecosistémicos atribuidos a una parcela de tierra, (3) ubicar sistemas USSE en tierras que maximicen la producción energética y minimicen los costos económicos y ambientales, (4) tener personas y entidades involucradas con compromisos a largo plazo con el proyecto, y (5) exigir a los desarrolladores que internalicen los costos. Además, la estandarización de la rigidez y la calidad de las regulaciones para todos los proyectos de USSE puede servir para racionalizar el desarrollo de USSE.

Los autores concluyen que los impactos ambientales desfavorables de USSE no se han evaluado cuidadosamente ni se han ponderado con los numerosos beneficios ambientales, particularmente en la mitigación del cambio climático, y los beneficios colaterales que ofrecen los sistemas de energía solar. De hecho, varias características y estrategias de desarrollo de los sistemas

USSE tienen un bajo impacto ambiental en relación con otros sistemas energéticos, incluidas otras tecnologías de energía renovable.

El estudio de Hastik et al (2015) aborda el desafío de conciliar la expansión de las energías renovables con la preservación de los valores naturales y culturales en los Alpes. Minimizar los impactos ambientales representa uno de los desafíos más importantes en la actualidad por la competencia por el uso de la tierra y aceptación social y las compensaciones con la conservación de la naturaleza y la biodiversidad. Plantean la una evaluación de los impactos con un aplicando servicios ecosistémicos.

Los autores identificaron que se ha hecho poco trabajo para comparar las fuentes de energías renovables teniendo en cuenta múltiples dimensiones (social, ecológica y económica). Sin embargo, destacan la necesidad de una perspectiva más amplia, que incluya las energías renovables con sus repercusiones ambientales y sociales multifacéticas, para desarrollar estrategias de expansión de las energías renovables y priorizar el crecimiento de las energías renovables específicas en una región.

Los Servicios Ecosistémicos SE son los beneficios que proporcionan los ecosistemas a los seres humanos, que dependen de la biodiversidad como suma total de la vida. Los beneficios enunciados de la vinculación de los SE a la evaluación de los impactos de las energías renovables son: (1) el carácter inter y transdisciplinario del concepto permite evaluar múltiples problemas ambientales que surgen como consecuencia de la presión antropogénica sobre los ecosistemas; (2) facilita una comparación sistemática de las ER alternativas y sus impactos en diferentes SE; (3) El concepto se desarrolló para cerrar la brecha entre la ciencia y la práctica y apoya la inclusión y el diálogo entre las partes interesadas y facilita los procesos de toma de decisiones.

En este artículo, se revisan y elaboran los estudios existentes sobre los impactos de varias fuentes de energías renovables desde una perspectiva de servicios ecosistémicos en los centros de producción de la zona alpina y no tiene en cuenta los impactos causados por la producción, eliminación o reciclaje de los elementos.

Los impactos identificados en la literatura causados por la energía fotovoltaica montada en el suelo (GM-PV) los llamados "parques solares" son múltiples, como la competencia por el uso de la tierra, las alteraciones visuales del paisaje, los cambios microclimáticos y las reflexiones. Estos impactos son relacionados con un SE y una valoración alta, media, baja. Los resultados del

estudio de los impactos en 3 tipos de servicios ecosistémicos correspondientes a la energía fotovoltaica GM son:

Tabla 1

Impactos de la energía fotovoltaica montada en el suelo en los servicios ecosistémicos

| Servicio ecosistémico | Tema | Impacto | Valoración |
|---|---|---|-------------------|
| Servicios de aprovisionamiento | Provisión de productos forestales / agrícolas | Posible competencia por productos agrícolas | Alto |
| | Provisión y filtrado de agua | Ninguno o solo impactos menores asumidos | Bajo |
| Servicios de regulación y mantenimiento | Regulación climática | Impactos en caso de cambios inadecuados de uso de suelo | Bajo |
| | Hábitat para flora y fauna | Solo se asumen impactos menores. Se requiere evitar hábitats importantes. | Medio |
| | Protección contra riesgos naturales | Ninguno o solo impactos menores asumidos | Bajo |
| Servicios culturales | Valores recreativos y estéticos | Impactos visuales en la composición del paisaje. | Medio |

Nota. Fuente (Hastik, y otros, 2015)

El impacto de mayor interés es el cambio de uso de la tierra, especialmente es importante la protección de la naturaleza local y la protección contra peligros en zonas topográficas extremas como en el caso de los Alpes por una explotación extensiva que afecte grandes áreas y otro punto importante es el equilibrio entre los paisajes montañosos con un paisaje industrializado por la generación de energía por parques solares.

Como recomendaciones dadas en el estudio es la información y transparencia y la participación justa en el proceso de planificación de todos los interesados. Una preocupación es la falta de tierras habitables en muchas zonas alpinas por lo tanto se debe promover el uso de energía fotovoltaica en edificios y la generación de energía fotovoltaica es relativamente nueva en la región y no se ha examinado la aceptación. Por lo tanto, los autores indican que los responsables de la toma de decisiones deben desarrollar e implementar una visión integrada e intersectorial del paisaje para los Alpes, con objetivos concretos y medidas de implementación independientemente del tipo de energía renovable a desarrollar.

Una conclusión de los autores en la revisión de las fuentes bibliográficas es que la mayoría están especializadas en un tema en particular y prestan poca atención a la interacción de diversos temas ambientales, económicos o sociales relacionados con las energías renovables.

La ONU en el año 2015 aprobó la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible con el objetivo número 7 (ODS7): energía asequible y no contaminante, el cual busca «Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos». (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2022), porque actualmente los combustibles fósiles representan el 81% del consumo mundial de energía primaria, contribuyendo con más de dos tercios de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes al entorno y para el sector eléctrico representan actualmente el 74,2%. (Phuang, Lin, Leiw, Hanafiah, & Woon, 2022)

Con la implementación de la transición energética a nivel mundial especialmente con el uso de la energía solar para producir electricidad se generan planteamientos como los indicados por Moore-O’Leary K. et al. (2017) “El desarrollo de la energía renovable es un campo en el que chocan los valores ecológicos, políticos y socioeconómicos. Los avances en energía renovable incurrirán en costos ambientales elevados para los paisajes en los que se construyen y operan las instalaciones”.

García (2021) indica que en España se ha ratificado la primera Ley de Cambio Climático donde el objetivo para el año 2050 es alcanzar la descarbonización, es decir, la neutralidad climática y para el año 2020 cuenta con una potencia solar PV instalada de unos 11.5 GW corresponde al 10.7% del total de la demanda eléctrica y se espera que para el 2030 la demanda sea del 25%. Por este motivo, se requiere cuantificar las emisiones de GEI vinculadas a la construcción y operación de la planta solar y, por otra parte, las vinculadas al impacto ambiental de la planta solar.

García indica que 8 estudios revisados entre 2000 al 2018 varios de ellos emplean el ACV (Análisis del Ciclo de Vida) y revisan los parámetros, emisiones GEI, la eficiencia, entre otros y los impactos ambientales como el potencial de acidificación, de eutrofización, formación de ozono fotoquímico, toxicidad humana, potencial de agotamiento abiótico, potencial de ecotoxicidad tanto en agua salada como dulce, entre otros.

La conclusión, es que en las etapas de fabricación y embalaje y transporte son las fases que mayor impacto en la generación de emisiones de CO₂ y se omite la etapa desmantelamiento en los estudios encontrados porque no existe mucha información, aunque en el futuro de esta tecnología es un aspecto clave porque el transporte de los residuos, incineración, reciclaje y otros tratamientos adicionales tienen un mayor impacto de acuerdo con el estudio citado de (Latunussa, Ardente, Blengini, & Macini, 2016) sobre el reciclaje de los paneles solares.

Una mirada a los impactos negativos de la energía solar fotovoltaica lo realiza por Lamas, D en la revista de la Universidad Nacional de Lanús en el año 2020 que presenta las siguientes dos conclusiones de su artículo: “algunas veces se piensa que producen cero contaminaciones también tienen su impacto negativo durante su proceso de elaboración y posterior eliminación” y “los potenciales impactos medioambientales asociados a la energía solar, como el uso de suelo y pérdida de hábitats, el uso de agua, así como el uso de materias primas peligrosas en la fabricación de paneles y otros componentes de las instalaciones solares, varían mucho en función de la tecnología empleada.”

Según Sawyer H. et al. (2022) la energía solar en comparación con otras energías renovables es la que tiene las emisiones de gases de efecto invernadero más bajas del ciclo de vida y, en algunos casos puede tener una alta eficiencia en el uso de la tierra. Los impactos asociados con la energía solar en gran escala (USSE), son la cantidad de tierra que requieren las instalaciones, esto tiene gran impacto en los paisajes y pérdida directa e indirecta de hábitat de fauna y flora. En su estudio se enfoca en los impactos potenciales del desarrollo solar en la vida silvestre, especialmente en animales ungulados ya que los USSE pueden alterar o bloquear los movimientos o migraciones de estas especies (ver Tabla 2) y poder brindar pautas para minimizarlos, así poder tener consideraciones importantes para equilibrar los beneficios globales de la energía renovable con los impactos en la vida silvestre donde se construyen estos parques solares.

Tabla 2

Resumen de la pérdida de hábitat por desarrollo solar y los efectos de barrera para los Antilocapra americana residentes y migratorios en suroeste de Wyoming 2018-2020

| Segmento de rebaño | Proporción de animales afectados | Pérdida de hábitat | Efecto Barrera |
|------------------------------|---|-----------------------------|--|
| Residentes | 69% | Hábitat durante todo el año | Movimientos diarios y estacionales |
| Migrantes locales | 86% | Hábitat migratorio | Movimientos migratorios anuales de primavera y otoño |
| Migrantes de manada de ópalo | 57% | Hábitat migratorio | Movimientos migratorios periódicos |

Nota: Fuente (Sawyer, y otros, 2022)

Moore S. et al. (2022) presenta un estudio, realizado en los Estados Unidos con la construcción de los parques solares en tierras agrícolas y las perspectivas de las partes interesadas. Este trabajo plantea que existen diferentes actores en la construcción de los paneles solares como

son los políticos, el gobierno local, las empresas desarrolladoras de energía solar, empresas de servicios públicos, ONG, terratenientes, arrendadores de las tierras, científicos, ingenieros, comunidad agrícola y otros grupos de interés. Donde se cuestiona la capacidad que tienen los dueños de la tierra para tomar decisiones de arrendarlas para la construcción de los sistemas de energía o para producción agrícola donde las tierras de cultivo son un bien público y las decisiones de ubicación de los parques solares se deben tomar con base en los intereses de la comunidad.

El conflicto de la instalación de los parques en tierras agrícolas es la percepción de pérdida que tienen los arrendatarios y arrendadores de las tierras de producción, el pago por arrendamiento para cultivos es menor que para la construcción de parques solares, esto hace atractivo el mercado de los parques solares. Lo anterior genera la preocupación para las próximas generaciones de agricultores. (Moore, Graff, Ouellet, Leslie, & Olweean, 2022)

Según Moore S. et al. (2022) la relación entre la energía solar a escala de servicios públicos y las comunidades requiere cambios. Una de las soluciones tecnológicas planteadas en el artículo es la energía agrovoltaica. La energía agrovoltaica, también conocida como agrofotovoltaica, consiste en aprovechar una misma superficie de terreno tanto para obtener energía solar como productos agrícolas. Es decir, los paneles solares conviven con los cultivos sobre la misma superficie. Esta técnica fue concebida originalmente por Adolf Goetzberger y Armin Zastrow en 1981. (Iberdrola, 2022).

Otro de los puntos a considerar en la implementación de la energía solar es la cantidad de millones de paneles solares y de los equipos auxiliares requeridos para cumplir con la demanda de energía eléctrica. Sin embargo, se plantean las siguientes preguntas en torno la sostenibilidad de esta tecnología ¿de qué están compuestos los paneles solares y sus auxiliares?, ¿cómo se obtienen sus elementos? y ¿cuál es su disposición después de cumplir su vida útil? Varios autores han realizado diferentes investigaciones para encontrar respuestas a estas preguntas.

Teniendo en cuenta los minerales y las tierras raras actualmente cumplen un rol imprescindible en la transición energética, son los insumos para la producción de las tecnologías de energías renovables como son las baterías, paneles solares, imanes para turbinas eólicas, entre otros componentes. Estos elementos según Huber y Steininger (2022), tienen cuestionamientos de sostenibilidad relacionados con la cadena de suministro asociados a la extracción como son la toxicidad, disponibilidad finita, riesgos de gobernanza, violaciones de los derechos humanos,

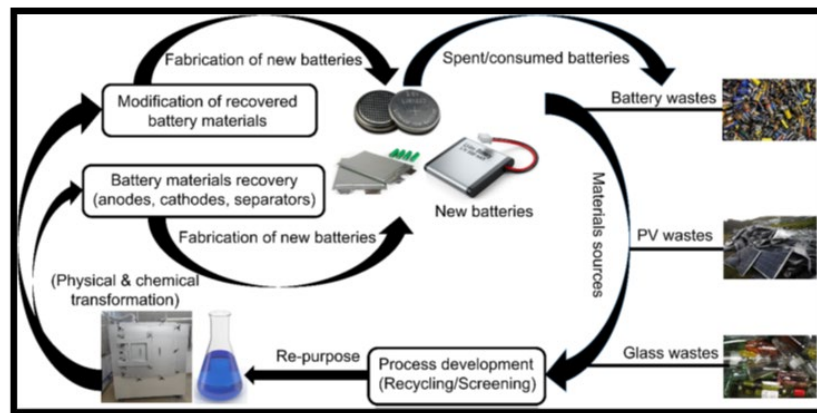
financiación de conflictos violentos, falta de transparencia, trabajo infantil, falta de normas de seguridad y problemas de salud laboral.

La disposición final de los residuos de la tecnología fotovoltaica ha sido fuente de análisis, de acuerdo con Chaparro J. (2019) la cantidad de unidades de paneles solares, baterías, entre otros equipos asociados sean desechados una vez se terminen su ciclo de vida en un par de años, se convertirán en una fuente importante de generación de residuos sólidos que en algunos casos serán potencialmente peligrosos. Se evidencian los impactos ambientales que se tendrían tener a futuro en las etapas de desmontaje y destrucción de los paneles solares fotovoltaicos podrían presentar un grado de alteración y contaminación a los ecosistemas, lo que llevaría a que un mal manejo de estos residuos de características potencialmente peligrosos podría generar pérdidas y alteraciones de ecosistemas y propagación de enfermedades o alteraciones a la salud humana.

De acuerdo con Sultana I. et al (2022), es fundamental los esfuerzos de investigación se centren en el desarrollo de métodos de reciclaje para aliviar la carga ambiental por la disposición insegura de desechos de los sectores de baterías, fotovoltaico y vidrio, aunque estos contribuyen significativamente a la economía mundial. Muchos de estos desechos son infrutilizados al final de su vida útil y el reciclaje de estos materiales tienen el potencial de ser reutilizados como nuevos materiales para la fabricación de nuevas baterías, ver Figura 1. También, Aunque existen desafíos en la recuperación, purificación y nano estructuración, fabricación de nuevos electrodos de batería, y su posterior aplicación en baterías de iones de litio.

Figura 1

Esquema de reciclaje de materiales para la fabricación de baterías.



Nota. Fuente (Sultana, Chen, Huang, & Rahman, 2022)

Otro impacto ambiental en la instalación de USSE es el uso del agua. De acuerdo con Guzmán C. (2017) el mayor desperdicio de agua se da en la instalación, limpieza y uso, como ejemplo para una instalación de 230 a 550 MWp se pueden requerir hasta 1500 millones de litros de agua, con el fin de controlar el polvo durante la construcción, además de otros 26 millones de litros de agua para el control de polvo durante su construcción durante el año.

Estos planteamientos son relevantes por el aumento a nivel mundial de generación de energía eléctrica con GM-PV (energía fotovoltaica sobre el suelo). Una mirada de este crecimiento se puede evidenciar según SRM Consulting basados en la herramienta de seguimiento mundial de instalaciones solares fotovoltaicas Global Solar Power Tracker al 26 de mayo de 2022 incluye la información de 9331 campos solares en 148 países, que suman 290 GigaWatts de capacidad operativa actual y 652 Giga Watts de capacidad potencial. Los 3 países con la mayor capacidad operativa de proyectos a gran escala son: China (130,3 GW), Estados Unidos (43,4 GW) e India (29,0 GW). En la siguiente tabla se resumen los 10 parques solares más grandes del mundo de acuerdo con la empresa DS Nueva Energía (Zhejiang DongShuo New Energy Co., Ltd) en 2021.

Tabla 3
Los 10 parques solares más grandes del mundo en 2021.

| Racking | Nombre | País | Generación de Energía | Extensión | Paneles instalados | Año máxima capacidad |
|----------------|---|-------------|------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1 | Bhadla Solar Park | India | 2245 MWp | 5700 ha | > 10 Millones | 2018 |
| 2 | Huanghe Hydropower Hainan Solar Park | China | 2200 MWp | 564 ha | > 7 Millones | 2020 |
| 3 | Pavagada Solar Park | India | 2050 MWp | 5260 ha | | 2018 |
| 4 | Bengan Solar Park | Egipto | 1650 MWp | 3720 ha | | 2019 |
| 5 | Tengger Desert Solar Park | China | 1547 MWp | 4300 ha | > 2,3 Millones | 2019 |
| 6 | Noor Abu Dhabi | UAE | 1177 MWp | 780 ha | > 3,3 Millones | 2019 |
| 7 | Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park | UAE | 1013 MWp | 7200 ha | > 3 Millones | 2020 |
| 8 | Datong Solar Power Top Runner Base | China | 1000 MWp | | | 2016 |
| 9 | Kurnool Ultra Mega Solar Park | India | 1000 MWp | 2400 ha | > 4 Millones | 2020 |
| 10 | NP Kunta Ultra Mega Solar Park | India | 978 MWp | 3206 ha | | 2018 |

Nota: Recuperado de DS New Energy. (2021). Las 15 principales plantas de energía solar fotovoltaica por capacidad en todo el mundo a junio de 2021. <https://www.dsisolar.com/info/top-15-solar-pv-power-plants-by-capacity-world-61632550.html>

En las siguientes fotografías se puede tener una visualización del área empleada y la cantidad instalada de paneles solares en la construcción de dos de los parques enunciados anteriormente

Figura 2
Bhadla Solar Park



Nota. Adaptado de Soaking Up Sun in the Thar Desert, por NASA, 2022, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/149442/soaking-up-sun-in-the-thar-desert>

Figura 3
Pavagada Solar Park



Nota. Adoptado de A Glimpse at the Top 5 Largest Solar Parks in the World, por Glint solar, 2022, <https://www.glintsolar.ai/blog/glimpse-at-top-5-largest-parks-in-the-world>

En la revista de ACIEM (2023) en el marco de la 40ª Conferencia Energética Colombiana – ENERCOL 2023 se indica que, para sustituir 1000 megavatios de fuentes convencionales, se necesitarían 5000 megavatios solares, lo cual a su vez exigiría contar con 8000 hectáreas de terreno para cubrirlas con paneles, generando la alerta del impacto en el cambio del uso del suelo para los USSE en Colombia.

En Colombia ya están instalados varios parques solares. En febrero de 2024 por asociación de Enel y el Gobierno Nacional (Ministerio de Minas y Energía, 2024) en el departamento del Cesar se inauguró el Parque Solar más grande de Colombia, en la Loma con una inversión de \$126 millones de dólares, con una capacidad instalada de 187 megavatios en corriente directa (MWdc) con 400 mil paneles que están interconectados e instalados en 388,59 hectáreas que equivalen a 552 canchas de fútbol donde se generaron 1700 empleos y beneficiaria a 370 mil personas con energía solar y evitaría 168 toneladas de CO2 al año de acuerdo con la compañía Enel Green Power.

El Parque Solar Castilla cuenta con una extensión de 18 hectáreas, donde están ubicados más de 54500 paneles de la más alta tecnología, que generan la energía equivalente a la que se requiere para energizar una ciudad de 27000 habitantes. (Revista Semana, 2022).

El Ecoparque San Fernando, inaugurado en octubre de 2021 con una potencia instalada de 61 megavatios (MWp), a través del cual se abastece parte de la demanda de energía de las operaciones de Ecopetrol y Cenit en los Llanos Orientales. El parque ocupa una superficie de 57 hectáreas, donde están ubicados más de 114000 paneles solares de última generación. Los módulos pueden moverse según la orientación del sol y cuentan con tecnología bifacial que les permite captar energía por ambas caras, lo que asegura un mayor rendimiento y eficiencia. (Revista Semana, 2022).

En las siguientes figuras se tiene una vista aérea del parque solar Castilla y del Ecoparque San Fernando.

Figura 4
Parque Solar Castilla



Nota. Adaptado de Ecopetrol invertirá US\$34 millones para construir granjas solares en sus dos refinerías, por Revista Semana, 2022, <https://www.semana.com/economia/empresas/articulo/ecopetrol-invertira-us34-millones-para-construir-granjas-solares-en-sus-dos-refinerias/202203/>

Figura 5
Ecoparque San Fernando



Nota. Adaptado de Ecopetrol invertirá US\$34 millones para construir granjas solares en sus dos refinerías, por Revista Semana, 2022, <https://www.semana.com/economia/empresas/articulo/ecopetrol-invertira-us34-millones-para-construir-granjas-solares-en-sus-dos-refinerias/202203/>

2 Justificación

La dinámica de desarrollo económico del país, en los últimos años ha generado que la demanda de energía se aumente de forma considerable, permitiendo que el país desarrolle una política importante en la generación de energía y la exploración de medio alternativos, los cuales ayudan a complementar la alta demanda buscando generar aportes importantes en materia de Sostenibilidad. Es así que, en este proceso de energía alternativa, encontramos a la generación de energía solar a través de la tecnología fotovoltaica.

Este modelo de generación energética más limpia busca el planteamiento en materia de economía regenerativa planteado por la expositora (Gutiérrez, 2021) empleada de la Caja de Compensación COMFAMA, quien plantea que la economía regenerativa es un modelo que busca de manera importante restablecer el orden de las condiciones naturales y que al buscar a través de las herramientas actuales la forma como solucionar las dificultades de seguir avanzando en la civilización, pero apoyado en los ciclos y herramientas que la naturaleza nos brinda, reduciendo el impacto negativo que hemos realizado al planeta.

La producción de la energía fotovoltaica, como energía más limpia, sostenible y que puede ser utilizadas de forma eficiente, tema que se ha evaluado por la ONU y otras ONG'S expertas en materia de sostenibilidad planetaria ha permitido que otros países como los países nórdicos sean los más eficientes en el cumplimiento de los ODS. Parte de ese resultado de la capacidad de transición energética que estas regiones han desarrollado, ha sido la disposición política rápida lo que les permitió desarrollar su capacidad económica en la regeneración energética sostenible que permite generar recursos financieros que ayudan a establecer rutas de sostenibilidad, como ejemplo para las demás regiones del mundo (BBVA, 2021).

Es por ello por lo que en Colombia la producción de la energía a través de las redes o parques fotovoltaicos apenas está iniciando, con 15 granjas y las demás redes creadas por la población en zonas rurales. Esto ha llevado a que, nuestro país ocupe el puesto 6 en la región suramericana, gracias al desarrollo de las granjas que están siendo implementadas por parte de aquellas empresas generadoras de energía. A través del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, se estableció una ruta y se dejó plasmadas las zonas habilitadas para el cambio de uso de suelo y permitir la construcción de más granjas de celdas fotovoltaicas. La capacidad de producción energética, al ser combinada con las redes y la capacidad instalada de la energía hídrica del país,

permitirá que Colombia se fortalezca, y genere mayor competitividad y fortalecimiento en seguridad energética. A todo esto, se suman muchos ciudadanos de forma particular y entidades tanto estatales como privadas, que han venido implementando la transformación energética instalando plantas y celdas en espacios privados y públicos.

La dirigencia del país ha entendido la necesidad de ir a un sistema más sostenible de consumo y generación de energía limpia, es por ello que con la nueva política de generación de energía está muy claro la apuesta que existe en fortalecer las granjas de generación de energía solar y de otras energías alternativas más sostenibles, lo que conlleva a que se pueda reducir de forma importante la generación de energía con termoeléctricas, de esta forma se fortalece la capacidad instalada energética actual.

Es así como, nos preguntamos ¿si realmente es sostenible al 100% la generación de energía fotovoltaica?, si su sostenibilidad es realmente tan eficiente, pues, para producir esta energía es necesaria la transformación de materia prima, para la fabricación de cada panel e instalación de los parques y las plantas de almacenamiento de energía necesarias, generando de igual forma cambio de uso de suelo, afectando entornos, ecosistemas y población.

Los materiales que permiten que se construyan estos paneles y sus componentes de instalación y almacenamiento, como el Cadmio, Galio, Germanio, Arsénico, indio, Telurio, Aluminio, Cobalto, Grafito, Litio, Manganeso, etc, son extraídos y procesados de los recursos naturales del planeta. Esto lleva a revisar la demanda que el planeta y más puntualmente Colombia pretende tener en la creación de la red de granjas fotovoltaicas para la producción de energía solar. ¿Qué cantidad de estos minerales se requieren? Es claro que tal demanda termina afectando y generando mayor demanda de explotación de yacimiento de los minerales que se requieren para la fabricación de esta tecnología.

Al desarrollar y generar tal crecimiento de instalación tanto particular como gubernamental de los paneles se permite plantearnos la pregunta del título de este análisis, ¿Que tan sostenible es la transición energética fotovoltaica? Como elemento de apoyo para resolver esta pregunta en este trabajo se propone generar una lista de indicadores asociados a diferentes aspectos de la sostenibilidad, que permitan realizar el análisis de la implementación de esta tecnología en el contexto colombiano que pueda apoyar en la toma de decisiones para los proyectos en desarrollo sin tener que ocultar o esconder los impactos negativos. Adicionalmente, pueden aportar para generar planes o programas que ayuden a mitigar estos puntos negativos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Seleccionar indicadores relevantes para determinar la sostenibilidad en la implementación de proyectos de un sistema de generación de energía eléctrica con paneles solares en Colombia, que sirvan de insumo y guía para la toma de decisiones y creación de políticas teniendo en cuenta las dimensiones involucradas en la sostenibilidad.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar, en el estado del arte sobre los indicadores clave que determinan la sostenibilidad en la implementación de proyectos de energías renovables y eficiencia energética ya realizados a nivel internacional.
- Obtener un listado de indicadores relevantes en las dimensiones de la sostenibilidad con un sistema de clasificación para el contexto de Colombia y los sistemas fotovoltaicos.

4 Marco teórico

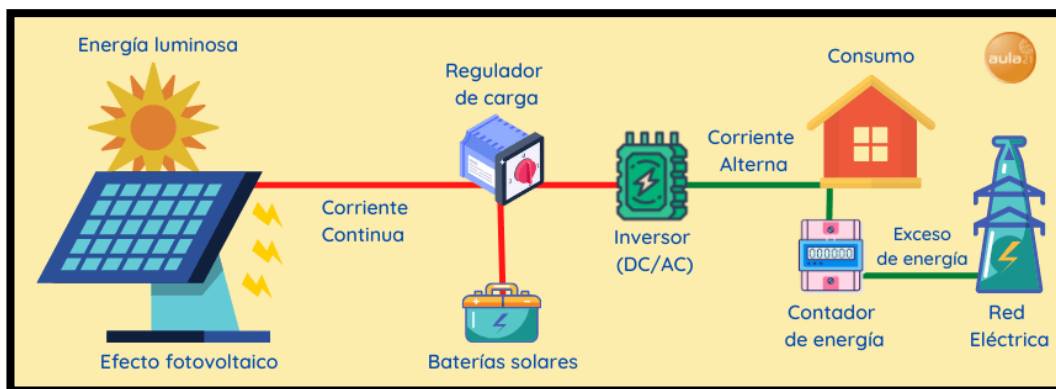
4.1 Marco conceptual

La Energía requerida por la civilización se puede definir como la capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, voltaje, etc. La energía puede provenir de diversas fuentes tales como los combustibles fósiles, las reacciones nucleares, el viento, el sol entre otras. En los procesos modernos de sostenibilidad, la humanidad está realizando una transición de la energía procedente de los combustibles fósiles como el carbón, el gas a fuentes de energía alternativa como son la eólica, solar, hidroeléctrica, biomasa, entre otras. Con el objetivo de disminuir las emisiones contaminantes causantes del cambio climático. Este trabajo se enfoca en la energía solar basada en la tecnología de los sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas solares fotovoltaicos están compuestos por distintas partes y estas a su vez están conformados por diferentes elementos que pueden variar de acuerdo con el tipo de tipo de panel como son el silicio, plata, boro, cobre, aluminio, litio, estaño, fósforo, carbón (como roca), titanio, perovskita, indio, cadmio, hierro, entre otros. (Villazón, 2022). En la Figura 6 se expone el esquema básico de funcionamiento del sistema fotovoltaico.

Figura 6

Esquema básico de funcionamiento del sistema fotovoltaico



Nota. Adaptado de Energía Solar Fotovoltaica: Qué es y cómo funciona, por AULA 21, <https://www.cursosaula21.com/que-es-energia-solar-fotovoltaica/>

En la búsqueda de energía que ayude a la tecnología satelital a ser sustentable en el espacio, se evidenciaron varios hallazgos que han permitido encontrar caminos que ayudan a la transición energética en el planeta, tal como se reporta en el Artículo de investigación satélite CUBESAT, titulado “celdas fotovoltaicas de alta eficiencia y sistema de paneles solares del CUBESAT Colombia” y de lo cual se extraen los siguientes apartes:

Desde el descubrimiento del efecto fotovoltaico en 1839 por parte de Becquerel, el hombre ha tratado de utilizar este sistema en celdas solares como una fuente alternativa de energía. Básicamente, una celda solar simple es una juntura p-n fabricada en una capa semiconductor, donde la luz es absorbida por electrones excitados de la banda de valencia del semiconductor a la banda de conducción.

A lo largo de la historia, los materiales más utilizados en la fabricación de celdas solares espaciales han sido silicio (Si), galio-arsénico (GaAs), indio-galio-fósforo (InGaP) e indio-fósforo (InP). Hasta antes de 1990 las celdas eran creadas con base en silicio monocristalino, policristalino y amorfo, alcanzando eficiencias entre el 12% al 17%.

Las estructuras de celdas solares basadas en AlGaAs (arseniuro de galio-aluminio) /GaAs(galio-arsénico) tienen una velocidad de recombinación de superficie baja y alcanzan una eficiencia entre el 20% a 25%. El inconveniente con las celdas de AlGaAs (arseniuro de galio-aluminio) es su alta velocidad de oxidación y una resistencia de radiación relativamente baja.

El proceso de desarrollo de la energía solar sigue su camino en la investigación de combinación de materiales que permitan más eficiencia en la optimización de generación de la energía dando varios resultados, con ello se desarrolla dos tipos de paneles utilizados en el planeta para generar y mejorar las condiciones de capturar la energía solar y transformarla en energía fotovoltaica, los paneles Cd-Te y los paneles de silicio. Estos desarrollos han aportado a mejorar la capacidad de optimizar la captura y producción de energía limpia, información que encontramos en el trabajo que se desarrolló en la investigación “Análisis Del Impacto Ambiental De Diferentes Tipos De Paneles Solares Según Los Materiales Utilizados Y Los Componentes Tóxicos Generados” desarrollada en la facultad de Educación Permanente y Avanzada de la Fundación Universidad De América de Bogotá D.C. en el año 2017.

Se debe tener presente que en la implementación de la tecnología no solo se requiere la fotocelda, también es necesario las baterías, las cuales permiten la captura de la energía convertida para ser utilizada en la red eléctrica, estos dispositivos son indispensables en el sistema, las cuales

requieren materia prima y para ello es necesario elementos químicos como el cobalto. Con propiedades magnéticas similares al hierro como su dureza, resistencia a la tensión y propiedades térmicas. El cobalto se puede encontrar en aguas dulces, suelos, plantas, meteoritos y en los nódulos de manganeso encontrados en el fondo del océano.

También es necesario el Grafito. Este material aparece en rocas metamórficas como resultado de la reducción de los compuestos de carbono de rocas sedimentarias durante el metamorfismo. También se encuentra en rocas ígneas y en meteoritos.

El Litio es otro elemento alcalino, necesario en la producción de las baterías. Este material en su forma pura es un metal blando, de color blanco plata, que se oxida rápidamente en aire o agua, Es empleado especialmente en aleaciones conductoras del calor y en baterías eléctricas.

Por último, el Manganeso, elemento libre en la naturaleza, a menudo en combinación con el hierro y en muchos minerales. Como elemento libre, el manganeso es un metal con aleación de metales industriales con importantes usos. El manganeso puede causar un síndrome de intoxicación en los mamíferos, con daños neurológicos que a veces son irreversibles. El manganeso es un metal de transición blanco grisáceo, parecido al hierro. Es un metal duro y muy frágil, refractario y fácilmente oxidable. El manganeso metal puede ser ferromagnético, pero solo después de sufrir un tratamiento especial.

4.1.1 Indicadores de Sostenibilidad

En la literatura se encuentra diferentes definiciones para los indicadores. Según el informe de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2009) se señala “Un indicador se define como una función de una o más variables, que conjuntamente “midan” una característica o atributo de los individuos en estudio”. En términos generales, un indicador o un conjunto de indicadores cumplen la función de explicar y valorar o medir de forma cuantitativa o cualitativa de forma objetiva un sistema, una actividad, un comportamiento o un fenómeno de una variable permitiendo una comparación con un objetivo, meta o compromiso y permite evaluar su desempeño y su comportamiento en el tiempo.

Los indicadores deben satisfacer los criterios: debe ser medible, entendible y controlable. Existen una gran variedad de indicadores dependiendo de que miden: de eficiencia, de eficacia, de

efectividad, de economía, de calidad, de procesos, de productos, de insumos, y de resultados. (García Acosta, 2018).

Según las Naciones Unidas, el desarrollo sostenible implica como debemos vivir hoy si queremos un futuro mejor, ocupándose de las necesidades presentes sin comprometer las oportunidades de las generaciones futuras de cumplir con las suyas. Brundtland coincide el desarrollo como la integración de los ámbitos económicos, sociales y ambientales, señalando que los procesos de desarrollo deben equilibrar los avances en estos tres aspectos, en forma simultánea y equilibrada (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) & Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), 2009)

El desarrollo energético es relevante para el desarrollo sostenible de los países porque aportan desarrollo político, económico y social. Sin embargo, las fuentes de energía renovables o no renovables generan impactos ambientales, sociales y económicos. Por tal motivo, se han desarrollado diferentes indicadores e índices para medir el Desarrollo Energético Sostenible (SED).

Un ejemplo de los indicadores son los desarrollados por el Organismo Internacional de Energía Atómica, en el documento Indicadores Energéticos del desarrollo Sostenible: Directrices y Metodologías del 2008, presenta el conjunto básico de 30 Indicadores energéticos del desarrollo sostenible IEDS (ver Anexo 2), estructurados en las tres dimensiones (social, económica y ambiental), temas y subtemas, de conformidad con el mismo marco conceptual empleado por la Comisión de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (CDS). Estos indicadores buscan lograr un entendimiento más a fondo de los principales problemas del sector energético de un país o región. Además, son herramientas para dar a conocer a los encargados de las políticas y al público general, las cuestiones energéticas relacionadas con el desarrollo sostenible y fomentar el diálogo institucional (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2008)

Igualmente, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en la guía metodología para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible del año 2009 plantea que los indicadores ambientales y de desarrollo sostenible son un sistema de señales claras y oportunas sobre un determinado proceso ambiental, en el cual se construye un sistema de información selecta que permite a los países, partes interesadas o comunidades evaluar su progreso en cuanto a determinadas metas. Los indicadores ambientales, sociales y económicos, permiten a las diferentes partes interesadas compartir información cuantitativa, selecta, procesada, descrita y contextualizada, así, facilitando una mejor comunicación y facilitando de forma objetiva la toma

de decisiones, respecto a políticas públicas y priorización de intervenciones donde los problemas sean más críticos, más mayores o urgentes. Los aspectos fundamentales para la elaboración de indicadores según CEPAL, son los siguientes:

- Los indicadores deben ser capaces de reflejar y recoger los intereses de lugares, gente, cultura e instituciones diferentes, ya que estos pueden ser grupos de interés para la organización que atienden a diferentes requerimientos de información y comunicación.
- Los conjuntos de indicadores deben evolucionar con el tiempo para mantener su utilidad, por lo que deben estar en constante revisión.
- La cualidad de evaluar calidad y cuantificar cambios ambientales.
- Pronosticar tendencias.
- Que sea de fácil colección, medición e interpretación en sus resultados.
- Bajos costos de operación.
- Deben ser técnicamente consensuados y políticamente aprobados a través de las consultas.
- Tener un alto conocimiento, dominio y referencia sobre el indicador propuesto.
- Debe estar en función de medir y resolver los problemas más sentidos del ambiente y los recursos naturales.
- Debe estar en función del interés y capacidad institucional para la colecta y validación de la información y líneas de base.
- Deben estar ponderados bajo un sistema de clasificación de alerta de acuerdo con el nivel de tolerancia o permisible.

4.1.2 Marco Legal

En materia legal, el marco regulatorio colombiano que posee hoy en día la generación de la energía renovable es importante y muy consolidado y en especial la generación de energía solar y como se desarrolla la integración a la red eléctrica nacional, la utilización del uso de suelo, con esto es claro que la implementación de la energía alternativa de generación solar tiene una regulación amplia y suficiente, es así como en Colombia se tiene el marco regulatorio presentado en la Tabla 4.

Tabla 4
Resumen de la normatividad

| Norma o Ley | Objeto o descripción |
|--|---|
| Ley 29 de 1990 | Por la cual se dictan disposiciones para el fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico y se otorgan facultades extraordinarias |
| Decreto Nacional 393 de 1991 | Por el cual se dictan normas sobre asociación para actividades científicas y tecnológicas, proyectos de investigación y creación de tecnologías |
| Ley 143 de 1994 | Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética |
| Ley 388 de 1997 | Los planes de ordenamiento territorial clasificarán el territorio de los municipios y distritos en suelo |
| Ley 1454 de 2011 | Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial |
| Ley 1286 DE 2009 | Por la cual se modifica la Ley 29 de 1990, se transforma a Colciencias en Departamento Administrativo, se fortalece el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia |
| Decreto Nacional 4923 de 2011 | Por el cual se garantiza la operación del Sistema General de Regalías |
| Ley 1715 de 2014 | Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional |
| Decreto Nacional 2492 de 2014 | Por el cual se adoptan disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda |
| Decreto Nacional 2469 de 2014 | Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración |
| Decreto Nacional 2143 de 2015 | Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo III de la Ley 1715 de 2014.” |
| Resolución UPME 0281 de 2015 | Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala” |
| Resolución CREG 024 de 2015 | Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) |
| Decreto Nacional 1623 de 2015 | Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas |
| Resolución Ministerio de Ambiente 1283 de 8 agosto de 2016 | Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables – FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones |
| Decreto Nacional 348 de 2017 | Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala |
| Resolución 0549-2015, emitida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio | Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la parte 2, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones |
| Resolución Ministerio de Ambiente 1988 de 2017. PAI 2017 – PROURE | Programas para Exclusión IVA |
| Resolución UPME 585 de 2017 | Procedimiento ante UPME Exclusión de IVA |

| Norma o Ley | Objeto o descripción |
|--|--|
| Resolución Ministerio de Ambiente 2000 de 2017 | Procedimiento ante ANLA para exclusión de IVA |
| Decreto Nacional 1543 de 2017 | Por el cual se reglamenta el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, Fenoge |
| Resolución CREG 201 de 2017 | Por la cual se modifica la Resolución CREG 243 de 2016, que define la metodología para determinar la energía firme para el Cargo por Confiabilidad, ENFICC, de plantas solares fotovoltaicas |
| Decreto Nacional 570 de 2018 | Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con los lineamientos de política pública para la contratación a largo plazo de proyectos de generación de energía eléctrica y se dictan otras disposiciones |
| Resolución CREG 015 de 2018 | Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional”. <i>Ver capítulo 10 para metodología de cálculo del servicio de respaldo</i> |
| Resolución CREG 030 de 2018 | Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional |
| Resolución CREG 038 de 2018 | Por la cual se regula la actividad de autogeneración en las zonas no interconectadas y se dictan algunas disposiciones sobre la generación distribuida en las zonas no interconectadas |
| Ley 1955 del 25 de mayo de 2019 | Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018 – 2022. “Pacto por Colombia, pacto por equidad”. El artículo 174 modifica el artículo 11 de la Ley 1715 de 2014 |
| Decreto Nacional 829 de 2020 | Por el cual se reglamentan los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014, se modifica y adiciona el Decreto número 1625 de 2016, Único Reglamentario en Materia Tributaria y se derogan algunos artículos del Decreto número 1073, Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía |
| Resolución UPME 203 de 2020 | Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para acceder a los beneficios tributarios en inversiones en investigación, desarrollo o producción de energía a partir de Fuentes no Convencionales de Energía - FNCE |
| Ley 2079 del 2021 | Permitan reducir el déficit habitacional cuantitativo y cualitativo en Colombia, mediante el aumento subsidios, del financiamiento a la demanda y la promoción de la oferta y el suelo urbanizable en el país. |

Nota. Fuente: Elaboración propia.

5 Metodología

La metodología propuesta para lograr el objetivo planteado es una revisión de la literatura científica existente, empleando ecuaciones de búsquedas en las bases de datos como Scopus, Science Direct, Google académico, repositorios de universidades nacionales, y en Google de forma general con palabras clave como desarrollo energético sostenible, política, indicadores, sistemas fotovoltaicos, energías renovables, sostenibilidad, ciclo de vida, impactos y paneles solares. Se realizaron diferentes combinaciones de estas palabras clave en español e inglés. El principal objetivo de esta primera etapa es realizar un análisis de la literatura encontrada que fuera relevante para el alcance de este trabajo teniendo en cuenta los títulos de los documentos generando una preselección de 78 artículos y/o documentos. Ver Anexo 1.

Posteriormente, se realizó una base de datos donde se incluía ítems como el título, autores, palabras clave, resumen y la estructura del contenido de estos. Para evaluar si estos artículos debían ser estudiados más a fondo. Se hizo lectura de los resúmenes y se seleccionaron 33 documentos. De esta búsqueda fue escaso el número de publicaciones centradas en Colombia, por eso se tuvieron en cuenta estudios de otras regiones de Latino América y el Caribe y de otros territorios para tener un contraste que pueda ser aplicado a Colombia.

De forma cualitativa se realiza una selección de los indicadores más representativos del desarrollo energético sostenible y posteriormente, se hace una limitación específica hacia los sistemas fotovoltaicos especialmente los parques solares que se tienen a nivel mundial de investigación o una propuesta de cuales indicadores se deberían tener en cuenta.

Posteriormente, se realizó una búsqueda de los avances en esta tecnología de generación de energía en Colombia y una investigación del contexto colombiano a nivel social, político, ambiental y económico para realizar la propuesta de un conjunto de indicadores específicos del contexto colombiano que sirvan de soporte para la evaluación y desarrollo de los proyectos de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia por las partes interesadas y así permitir el monitoreo del progreso hacia los objetivos de las políticas nacionales en el desarrollo energético sostenible, reflejar los desafíos, informar y apoyar la toma de las decisiones.

6 Revisión de la literatura

6.1 Contexto internacional

6.1.1 Contexto del desarrollo energético sostenible

La energía es un factor muy importante para lograr el desarrollo económico y seguridad social de un país por este motivo en la revisión literaria realizada se identifica la importancia de los indicadores para el monitoreo de las políticas del Desarrollo Energético Sostenible (SED) y que se han desarrollado múltiples indicadores para medir el progreso hacia el SED o algún aspecto de este.

En el año 2008, el Organismo Internacional de Energía Atómica, desarrolla una investigación que permitió generar el informe “Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías”, iniciativa internacional encaminada a definir un conjunto de indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS) y las metodologías y directrices correspondientes. Este trabajo se realiza con los esfuerzos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en colaboración en el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (UNDESA) de las Naciones Unidas, la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la Oficina Europea de Estadística de las Comunidades Europeas (Eurostat) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). En este documento se plantea que los indicadores deben interpretarse en el contexto de la economía de cada país según sus recursos energéticos, los impactos en cada una de las dimensiones, la forma de recopilar la información, la selección y utilización de los indicadores energéticos de acuerdo con sus necesidades y como diseñar sus propios programas nacionales de indicadores energéticos.

El informe destaca la importancia de los indicadores energéticos del desarrollo sostenible IEDS, como una herramienta para los encargados de las políticas y tomadores de decisiones. Se componen en 30 indicadores, clasificados en tres dimensiones social, económica y ambiental; subdivididas en 7 temas y 19 subtemas (Ver Anexo 2) y es posible que un indicador pertenezca a más de una dimensión. La dimensión social impacta directamente sobre la equidad social y la salud humana, la dimensión económica es esencial para un suministro de energía seguro y adecuado para todos los sectores de la economía y por último, la dimensión ambiental relaciona los efectos de la

producción, distribución y consumo de la energía en el medio ambiente. Esta investigación subraya la relevancia de aplicar la segmentación de la información para avanzar en el conocimiento de Indicadores de la Sostenibilidad. En el capítulo 5 de ese informe se presentan las hojas de metodología destinadas a cada uno de los indicadores clasificados por dimensión, con una breve definición, la unidad, definiciones de alternativas, pertinencia política, descripción metodológica, evaluación de los datos y referencias para cada uno de los indicadores. (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2008).

En la “Guía metodológica Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible” preparado por Andres Schuschny y Humberto Soto, funcionarios de la CEPAL en cooperación con la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) (2009) propone un enfoque para simplificar conceptos multidimensionales en un índice simple con base en modelo conceptual. Estos indicadores buscan proporcionar a los tomadores de decisiones información clara para brindarles la capacidad de evidenciar los datos y herramientas para implementar estrategias y políticas públicas sostenibles. El poder de síntesis de los indicadores compuestos permite ofrecer la participación de diversos actores, la vinculación y comunicación entre ellos.

El proceso de construcción de un indicador compuesto, con rigor metodológico, requiere el análisis de distintas cuestiones, las cuales son detalladas partiendo de la base de un esquema de construcción por etapas. Estas etapas para la construcción de un indicador compuesto son: (i) Desarrollo de un marco conceptual; (ii) Selección de los indicadores; (iii) Análisis multivariado; (iv) Imputación de datos perdidos; (v) Normalización de los datos; (vi) Ponderación de la información; (vii) Agregación de la información; (viii) Análisis de robustez y sensibilidad. La calidad de la información es crucial, ya que define la fortaleza de un indicador, la relevancia, la frecuencia de muestreo, su disponibilidad al dominio público y el marco conceptual justifica la construcción del indicador y su valor para luego ser analizado.

Los indicadores compuestos integran y resumen múltiples dimensiones, ofreciendo una visión general que atrae el interés público por su capacidad de facilitar una comparación entre unidades, fácil de interpretar, y analizar su evolución.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada en septiembre de 2015 por la Asamblea de General de las Naciones Unidas, establece una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental donde los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) permiten evaluar, analizar y formular los medios para alcanzar el desarrollo sostenible en

los países miembros. El ODS 7 “garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos” permite entender por qué es necesario alcanzar este objetivo, y lo que hace falta para conseguirlo. Las cuatro dimensiones del Objetivo 7 son la asequibilidad, la fiabilidad, la sostenibilidad y la modernidad. (Naciones Unidas, s.f.).

Las metas e indicadores del ODS 7 empleados para dar el seguimiento al cumplimiento del acceso a los servicios de energía, mejorar la eficiencia y el aumento del uso de fuentes renovables, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5
Metas e indicadores del ODS 7 Energía asequible y no contaminante

| Ítem | Metas del Objetivo 7 | Indicadores |
|------|---|---|
| 7.1 | De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos. | 7.1.1. Proporción de la población con acceso a la electricidad. 7.1.2. Proporción de la población cuya fuente primaria de energía consiste en combustibles y tecnología limpios. |
| 7.2 | De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas. | 7.2.1. Proporción de la energía renovable en el consumo final total de energía. |
| 7.3 | De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética. | 7.3.1. Intensidad energética medida en función de la energía primaria y el PIB. |
| 7.a | De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias. | 7.a.1 Corrientes financieras internacionales hacia los países en desarrollo para apoyar la investigación y el desarrollo de energías limpias y la producción de energía renovable, incluidos los sistemas híbridos. |
| 7.b | De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo. | 7.b.1 Inversiones en eficiencia energética en proporción al PIB y a la cuantía de la inversión extranjera directa en transferencias financieras destinadas a infraestructura y tecnología para servicios de desarrollo sostenible |

Nota. Fuente: La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>.

En el año 2018 se realizó la primera reunión del Grupo de Coordinación Estadística para la Agenda 2030 en América Latina y el Caribe fue organizada por la División de Estadísticas de la CEPAL en su calidad de Secretaría Técnica del Grupo realizo una priorización de los indicadores para el seguimiento regional de los ODS con el objetivo de contribuir a priorizar conjuntamente

los esfuerzos de medición, coordinar de forma efectiva la cooperación horizontal, regional e internacional y avanzar en el cierre de las brechas estadísticas y no dejar a nadie atrás. Lo anterior quedó plasmado en el Informe del proceso de priorización de indicadores para el seguimiento estadístico regional de los ODS en América Latina y el Caribe de la Decimoséptima Reunión del Comité Ejecutivo de la CEA-CEPAL (Naciones Unidas, 2018); para el ODS 7 los indicadores priorizados para la región se indican en la Tabla 6.

Tabla 6
Indicadores priorizados del ODS7 por el CEA-CEPAL en el 2018

| Ítem meta | Ítem Indicador | Indicador | Tipo |
|------------------|-----------------------|--|---------------------------------|
| 7.1 | 7.1.1 | Proporción de la población con acceso a la electricidad. | Marco de indicadores mundiales. |
| 7.1 | C-7.1b | Emisiones de dióxido de carbono (CO2) del sector energético. | Indicador complementario. |
| 7.2 | 7.2.1 | Proporción de la energía renovable en el consumo final total de energía | Marco de indicadores mundiales. |
| 7.3 | 7.3.1 | Intensidad energética medida en función de la energía primaria y el PIB. | Marco de indicadores mundiales. |

Nota. Fuente: informe del proceso de priorización de indicadores para el seguimiento estadístico regional de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/240f7bc3-71ab-4226-80a6-103014b0a4b1/content>

Por la importancia de la energía en el desarrollo económico de los países la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) organizó en el 2018 la primera Reunión Técnica sobre Eficiencia Energética en el marco del Observatorio Regional sobre Energías Sostenibles (ROSE) con el objetivo de intercambiar y discutir las mejores prácticas en la región de América Latina y el Caribe (ALC) para mejorar las capacidades de los países para rastrear el progreso en la implementación del ODS7 teniendo en cuenta los datos e indicadores de Eficiencia Energética, conocido como el programa Base de Información de Eficiencia Energética BIEE-ROSE. (CEPAL, 2018).

La CEPAL en el encuentro anual EUROCLIMA beneficiarios del sector de energía realizado en abril de 2023 manifiesta “La transición energética es un proceso de transformación sostenible del sistema energético que requiere un nuevo ecosistema de gobernanza, inversiones dirigidas a las renovables, marcos regulatorios modernos y adaptación de las instituciones, a través de políticas públicas y programas con hojas de rutas”. El diagnóstico presentado para ALC es que 16,1 millones de personas no tienen acceso a la electricidad, la matriz energética predominante es

fósil 67% y 33% renovable, la intensidad energética del PIB regional ha disminuido en un 28%, desde 1990; la gobernanza inadecuada del sistema eléctrico ha concentrado la inversión privada en el subsector de la generación con redes de transmisión y distribución deterioradas e insuficientes, reduciendo calidad, y aumentando la inseguridad energética; existe infraestructura de transmisión eléctrica y de gas natural como una oportunidad para la interconexión de electricidad de fuentes renovables e hidrogeno verde en la región, pero hay falta de acuerdos políticos y por último apenas 1 de 3 países de la región cuenta con políticas de transición energética. Por la importancia de estar monitoreando el avance de la región la CEPAL ha fortalecido las capacidades y la asistencia técnica al ROSE (Observatorio Regional de Energías Sostenibles), BIEE (Base de indicadores de eficiencia energética), las herramientas y cursos regionales. (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2023)

Para el contexto de América Latina y el Caribe, la CEPAL (2003) publica la Guía para la formulación de políticas energéticas que permite estandarizar, identificar y utilizar herramientas tales como los indicadores para brindar una mayor información en la elaboración de las políticas en la región de América Latina y del Caribe por la importancia de la energía como uno de los elementos fundamentales de la civilización moderna para el pleno desarrollo, social, económico de los pueblos, pero esta debe tener un componente medioambiental que permita establecer que el desarrollo de la malla energética de la subregión sea sustentable. Es necesario evaluar los diferentes indicadores y seleccionar un grupo por cada dimensión para generar una representatividad importante no muy grande o pequeño que se vuelva incomprensible o no permita realizar un correcto del contexto y no brindaría los elementos para la toma de decisiones correcta. En el marco del proyecto “Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe” por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la CEPAL y la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) se formula esta guía donde se presenta una lista de indicadores que se utilizaron en el análisis de las situaciones energéticas de los países de la región para responder a los objetivos de los sistemas energéticos y su vinculación con las diferentes dimensiones del desarrollo sostenible, ver en el Anexo 3. El proceso de conformación de este instrumento permite generar varios elementos importantes en la planificación, tales como el diagnóstico y evaluación del estado actual de la infraestructura energética de cada país, lo cual al implementar las herramientas generadas en la guía ayudan a que Latinoamérica continúe de manera más asertiva en la transición y transformación de su modelo de generación y consumo energético.

Gunnarsdottir et al (2020) señalan que los indicadores son herramientas clave para monitorear el progreso y formular políticas para el Desarrollo Energético Sostenible (SED). Sin embargo, en su revisión literaria critican los grupos de indicadores existentes por su alcance limitado, falta de transparencia metodológica, la falta de participación de las partes interesadas, así como por no capturar adecuadamente los aspectos de la SED. Estos autores tienen como objetivo evaluar la idoneidad de los conjuntos de indicadores existentes como los Indicadores Energéticos para el Desarrollo Sostenible (EISD), Índice Trilema Energético (ETI), y el Índice de Desempeño de la Arquitectura Energética, entre otros. Los autores concluyen que se tiende a enfatizar demasiado los aspectos económicos y pasan por alto los aspectos sociales y ambientales, esto presenta una forma desequilibrada del SED.

Los autores del artículo aplicaron una metodología de búsqueda, evaluación, síntesis y análisis (SALSA), el método de bola de nieve para realizar la revisión sistemática de la literatura donde identificaron 57 conjuntos de indicadores y realizaron una clasificación y evaluaron los Principios de Evaluación y Medición de la Sostenibilidad de Bellagio. Ver en el Anexo 4 la tabla de criterios de evaluación del conjunto de indicadores. La conclusión de los autores es que a pesar de que existen múltiples conjuntos de indicadores para medir el progreso del SED muchos carecen de transparencia metodológica, tienen una visión desequilibrada en los impactos sociales, ambientales y económicos y, por último, el conjunto de indicadores debe reflejar el contexto nacional, los objetivos específicos del país y deben tener en cuenta la participación de todas las partes interesadas.

De acuerdo con Gunnarsdottir et al (2022) los indicadores más empleados para medir el SED son los indicadores del ODS7 de la ONU. Sin embargo, estos indicadores tienen limitaciones y deben complementarse con otros indicadores con el contexto a nivel nacional y así medir el progreso de las políticas para tomar decisiones y acciones. El caso de estudio del artículo es el sistema energético de Islandia, un país rico en recursos energéticos renovables, su sistema tiene una alta participación de fuentes renovables y un alto acceso al servicio de energía eléctrica el cual tiene sus propios desafíos en materia de sostenibilidad como la necesidad de usar sus recursos de manera sostenible, garantizar la seguridad energética, mejorar el sistema de transmisión y distribución hacia las regiones menos pobladas para garantizar la equidad y mejorar la eficiencia del sistema para reducir costos e impactos ambientales.

Para este caso de estudio, con el propósito de identificar los objetivos, evaluar los temas de importancia de las partes interesadas en el SED y seleccionar los indicadores que puedan medir el progreso hacia los temas y objetivos de SED identificados, los autores emplearon una metodología de enfoque iterativo y participativo de los actores interesados en el SED para Islandia. Esto involucró siete pasos, los primeros cuatro se dedican a identificar lo que implica el SED en el contexto islandés mediante la participación de grupos de interés por medio de entrevistas para determinar los objetivos de cada uno, analizar las entrevistas e identificar los temas relevantes y mediante dos rondas de encuesta Delphi para obtener una retroalimentación sobre los temas identificados y evaluar su importancia. Posteriormente, con los resultados, los temas seleccionados se organizaron dentro de un marco conceptual temático, se realiza una conexión entre los temas y objetivos con una lista preliminar de indicadores y finalmente, se refina la lista creando nuevos indicadores y aplicando criterios de evaluación para asegurar la idoneidad y calidad que puedan medir el progreso hacia los objetivos de SED.

Los indicadores propuestos para Islandia clasificados en los seis temas principales de SED se encuentran en el Anexo 5 donde se refleja la participación de un grupo diverso y equilibrado de partes interesadas y descartan indicadores que carecen de transparencia en su propósito y metodología. Una fortaleza del enfoque de este estudio es la integración de una metodología cualitativa y cuantitativa donde múltiples pasos de participación y verificación de las partes interesadas producen un conjunto único, completo e integral para el contexto estudiado porque reflejaría los desafíos que enfrenta el sistema energético estudiado. Adicionalmente, promueve la aceptación pública de las acciones, lo que es valioso para el éxito de las políticas y el avance hacia un sistema energético sostenible donde resalta la importancia de la participación de los grupos de interés para garantizar un proceso transparente y efectivo para la toma de decisiones.

El estudio realizado en Taiwan en 2010 (Tsai, 2010) se enfoca en el creciente consumo energético del país, resaltando los desafíos como la densa población, recursos naturales limitados y una alta dependencia de energía importada. Para abordar estos temas, Taiwan para el año 2009 se plantea crear una economía baja en emisiones de carbono y desarrollar la seguridad energética bajo los principios de alta eficiencia, bajas emisiones y reducción de la dependencia de combustibles fósiles extranjeros.

En el año 2002, el gobierno de Taiwan estableció un grupo de indicadores conocido como el sistema de indicadores de desarrollo sostenible de Taiwán (TSDI) para evaluar el progreso del

desarrollo sostenible en el país, que incluyen 40 indicadores en seis dimensiones (presión social, presión económica, calidad ambiental, recursos ecológicos, respuesta institucional y desarrollo urbano sostenible). Sin embargo, en la comparación realizada por los autores de estos indicadores con los IESD, solo dos estaban relacionados a la sostenibilidad energética que son CO₂ emisiones per cápita (ambiental) e intensidad energética derivada del uso de combustibles fósiles (económico), y no contienen temas relacionados con las energías renovables. El análisis de las tendencias de la sostenibilidad energética durante el periodo 2000 y 2008 con datos oficiales muestra que las políticas de energía sostenible en Taiwán deben centrarse en el uso eficiente de los recursos energéticos limitados, el desarrollo de energía limpia y la diversificación del suministro de energía. Igualmente, los autores propusieron un tercer indicador para realizar el monitoreo de la sostenibilidad energética “producción de energía renovable”. Del análisis compuesto de los tres indicadores mostraron que el país ha experimentado un progreso positivo hacia la sostenibilidad energética durante el periodo evaluado y recomiendan la incorporación de los indicadores participación de las energías renovables en el actual sistema TSDI.

En el estudio de Tubet (2016) se propone una metodología para evaluar la sostenibilidad del mix energético en España, con miras al 2033. La metodología se centra en interrelación entre diversos sectores públicos y privados y diferentes actores para lograr un sistema energético estable accesible y ambientalmente sostenible. Los pasos clave son: la selección de la tecnología, la definición de escenarios y el horizonte temporal, y la selección de los indicadores, en la Tabla 7 se muestra los indicadores seleccionados por Tubet.

*Tabla 7
Resumen de los indicadores ambientales, económicos, sociales.*

| Criterio | Tema | Indicador |
|-----------------|--------------------------------------|--|
| Medio ambiente | Emisiones | Acidificación atmósfera (teq SO ₂) |
| | | Calentamiento global (teq CO ₂) |
| | | Salud humana (teq C ₆ H ₆) |
| | | Ozono fotoquímico (teq C ₂ H ₄) |
| | | Acidificación acuática (teq H ⁺) |
| | Impactos al Agua | DQO (teq O) |
| | | Ecotoxicidad (teq CU) |
| | | Eutrofización (teq PO ₄ ³⁻) |
| | | Residuos |
| | | Residuos |
| Economía | Economía | Costes de capital |
| | | Costes de generación |
| Sociedad | Aceptación pública | Aceptación pública |
| | Seguridad y diversidad de suministro | Reservas fósiles |
| | | Independencia de la importación |

| Criterio | Tema | Indicador |
|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| | | Seguridad de suministro |
| | | Disponibilidad |
| | Salud y seguridad | Salud |
| | | Seguridad |
| | Temas intergeneracionales | Cambio climático |
| | | Reservas fósiles |
| | | Residuos nucleares |
| | Empleo | Empleo |

Nota. Fuente: (Tubet Abramo, 2016)

Posteriormente, esta autora realizó la integración de los indicadores de sostenibilidad a través de un análisis multicriterio de decisión para determinar las opciones más sostenibles para el futuro, empleando la técnica Proceso de Análisis Jerárquico AHP (ver Anexo 6) para conocer en que consiste). Las conclusiones principales del estudio son la técnica AHP, al ser combinada con una selección adecuado de indicadores, facilita la integración de los criterios de la sostenibilidad para determinar la mejor opción y es importante tener una planificación eléctrica nacional a mediano y largo plazo que defina claramente la contribución de cada fuente de energía en la matriz energética y los criterios ambientales, sociales, políticos y económicos a incorporar.

Boadu & Otoo (2023) examinan la actual situación de la energía eólica en África, destacando su potencial frente al poco acceso directo al servicio de energía eléctrica, donde solo el 50% de la población tiene acceso a ella a pesar de que el continente posee abundantes recursos energéticos renovables. El estudio muestra una reducción significativa en el costo nivelado medio ponderado de la energía (LCOE) mundial para la energía solar fotovoltaica y eólica entre el 2010 y 2019, y sugiere una disminución sustancial en el futuro para estas tecnologías por la innovación.

Los beneficios encontrados en la implementación de la energía eólica incluyen la generación de empleo en todo el ciclo de vida desde el diseño, fabricación, instalación y mantenimiento de los parques eólicos y con un impacto a otras cadenas de valor como logística, seguros, construcción, rehabilitación de tierras, finanzas, e impacto de ambiental producidos por la industria de la energía eólica, reafirmando lo indicado por la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA).

Sin embargo, los autores concluyen que existen barreras políticas y legislativas que limitan la explotación de estos recursos y recomiendan adaptar las políticas a la madurez de la industria eólica, considerando los avances tecnológicas y las condiciones económicas locales y por último, se sugiere realizar talleres que sirvan como plataforma para la generación e intercambio de

conocimiento para ayudar a aumentar la aceptación pública y aumentar la comprensión de las ventajas de la implementación de la energía eólica.

El estudio realizado en Nepal sobre la “Estrategia a Largo Plazo para Emisiones Netas Cero” con la plataforma de Análisis de Bajas Emisiones mediante un método cuantitativo para examinar el estado actual de las emisiones ambientales y los indicadores energéticos y estimar los beneficios colaterales ambientales, la mejora de la seguridad y equidad energética. (Shakya, y otros, 2023). A pesar del crecimiento económico, Nepal enfrenta desafíos como el aumento en las emisiones de GEI y la dependencia de los combustibles fósiles importados. El estudio plantea tres escenarios: de referencia (REF) tomando como base el año 2019 sin la implementación de las políticas recientes, un segundo escenario con medidas existentes (MEM) hasta 2020 y, por último, un escenario con medidas adicionales (WAM) y emplearon cinco indicadores para la seguridad energética: el índice de importación neta de energía (NEIR), la proporción de energía renovable (SRE), el índice Shannon-Weiner (SWI), la relación entre el costo del combustible importado y el PIB (FGDP) y la intensidad energética del PIB (EGDP) y para la equidad energética emplearon el consumo de electricidad per cápita.

Los resultados indican que las estrategias MEM y WAM podrían reducir sustancialmente las emisiones y mejorar la seguridad y equidad energética, considerando el crecimiento de la población y el económico. El estudio busca proporcionar una guía valiosa para los tomadores de decisiones durante la evaluación de las políticas existentes y futuras para lograr un desarrollo sostenible en Nepal.

Igualmente, en la región de Latinoamérica y el Caribe se han realizado estudios como el de Sheinbaum et al. (2009) se enfoca en analizar la política energética de México en el periodo comprendido entre 1997 y 2006, evaluando el desarrollo sostenible del sistema mediante los indicadores planteados por CEPAL (2003) (Anexo 3) y International Atomic Energy Agency (IAEA) del año 2005 (Anexo 7). Para analizar la sustentabilidad del sistema energético los autores seleccionaron los indicadores indicados en la Tabla 8 basados en la información disponible para poder evaluarlos.

El análisis de los indicadores revela que el sistema energético mexicano es menos sustentable en el año 2006 de lo que fue en 1997, a pesar de que hubo mejoras en la cobertura eléctrica y la satisfacción de las necesidades básicas. Este resultado acentúa la importancia de tener en cuenta todas las dimensiones de la sostenibilidad en el desarrollo de políticas y proyectos, así

Tabla 8
Indicadores de evaluación de sustentabilidad del sistema energético mexicano

| Temas | Indicadores | Método de obtención |
|--|---|---|
| Autarquía energética | Importación de energía primaria | Energía importada en combustibles (carbón, petróleo, gas etc) con relación al consumo de energía en México proveniente de combustibles |
| | Importación de hidrocarburos | Importación de hidrocarburos (petróleo y sus derivados) con respecto al consumo mexicano de hidrocarburos |
| Robustez frente a cambios extremos | Exportaciones energéticas al PIB | Valor de las exportaciones de petróleo crudo con respecto al PIB de México |
| | Participaciones de las exportaciones de petróleo en los ingresos nacionales | Valor de las exportaciones de petróleo crudo con al ingreso total de dinero que tiene el sector público mexicano |
| | Deuda del sector energético | Inversión de la empresa de petróleo mexicana obtenida mediante endeudamiento con respecto a la inversión total de la empresa de petróleo mexicana |
| Productividad energética | Inverso de la intensidad energética (Consumo nacional de energía / PIB) | Consumo nacional de energía / PIB |
| Cobertura eléctrica | Porcentaje de hogares con electricidad | Número de hogares con electricidad con respecto a la totalidad de hogares |
| Cobertura de necesidades energéticas básicas | Energía útil en el sector residencial | la energía útil se calcula conforme a las eficiencias establecidas por el Sistema de Información Económica y Energética (SIEE) de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Los valores asignados a las eficiencias son: electricidad (0.8), gas natural (0.5), GLP (0.4), querosina (0.35), leña (0.1). La cantidad de energía consumida por los hogares se clasifica según la fuente primaria (electricidad, gas, GLP, querosina y leña) y cada una de estas cantidades se multiplica por su correspondiente valor de eficiencia para obtener la energía útil |
| | Gasto de energía por deciles | Este indicador valora la equidad en el gasto de energía según los ingresos de los hogares. Es decir, que costo tiene la energía con respecto a los gastos totales de un hogar según sea su estrato, realizando la clasificación de estratos en deciles |
| Pureza relativa del uso de la energía | Emisiones de CO ₂ | Estas emisiones se calculan para las diferentes fuentes de energía utilizadas siguiendo la metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 1996) |
| Uso de energías renovables | Participación de energías renovables | Se define como el porcentaje de renovables respecto al consumo nacional total de energía. |
| Alcance recursos fósiles | Reserva de hidrocarburos entre producción. | Es el valor de las reservas de hidrocarburos (incluyendo probadas, probables y posibles) dividido por la producción bruta anual de hidrocarburos |

Nota: Evaluación de los indicadores de sustentabilidad energética para México. Tomado de (Sheinbaum Pardo, Rodríguez Padillas, & Robles Morales, 2009)

como la necesidad de monitorear y evaluar constantemente los indicadores para tomar decisiones informadas que lleven a un sector energético sustentable.

Meléndez (2014) realiza el análisis de la sostenibilidad energética de Guatemala mediante dos métodos diferentes, el primero es un método cualitativo mediante la definición de IEDS para las tres dimensiones del desarrollo sostenible, el otro cuantitativo mediante el desarrollo de un Índice de Sostenibilidad Energética (ISE) que permite medir el desempeño energético del país.

Para la evaluación, se recopilaron datos de diferentes fuentes de información primaria y estadísticas energéticas como el Sistema de Información Económica Energética (SIEE) de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), en el Sistema de Información Energética Regional (SIER) de OLADE; Indicadores del Desarrollo Mundial (IDM) del Banco Mundial; Estadísticas e Indicadores de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), estadísticas de recursos energéticos e índice de sostenibilidad del Consejo Mundial de Energía (WEC por sus siglas en inglés), informes estadísticos del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala (MEM), Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala (CNEE) y Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Se seleccionaron 23 de los 30 IEDS que mejor reflejan la situación energética de Guatemala y 20 de 22 indicadores para la construcción del ISE distribuidos en 4 dimensiones, equidad energética, seguridad energética, sostenibilidad ambiental y desempeño contextual. (ver Anexo 8).

El análisis revela las siguientes características del sector energético de Guatemala con los IEDS. En el ámbito social el nivel alto de pobreza rural y la falta de acceso a la electricidad, la dependencia del consumo de leña y la inequidad energética. En el ámbito económico, el potencial para ser energéticamente más seguro e independiente mediante las energías renovables y el petróleo, actualmente, el país no cuenta con normativas de eficiencia energética y su desempeño económico se realiza mediante el indicador del PIB per cápita. Por último, en el ámbito ambiental es un país con bajas emisiones de GEI, pero con altos riesgos de deforestación y uso de suelos.

Con la evaluación del ISE se identifica una gran inequidad energética en concordancia con los IEDS y una calificación de 6,60 en seguridad energética, influenciada por el uso de la leña. La sostenibilidad ambiental se encuentra bien calificada por las bajas emisiones de GEI y su potencial de fijación de CO₂ por sus bosques, aunque tiene preocupaciones por la calidad del aire y las emisiones del sector transporte.

La conclusión destaca la importancia de realizar el análisis anual de los IEDS y el ISE para fortalecer la política energética y alcanzar los objetivos del SED en Guatemala y resaltan la necesidad de tener instituciones que mantengan las estadísticas actualizadas y confiables para esta evaluación.

El estudio Hernández et al (2016) sobre la evolución de los indicadores propuestos por la OIEA adaptados para el contexto económico y energético del estado de Quintana Roo en México entre 2006 y 2014. Se seleccionaron indicadores específicos para evaluar las dimensiones social, económica y ambiental, como el acceso a la energía eléctrica; el consumo per cápita, el consumo energía por unidad de PIB, el porcentaje del ingreso económico en el hogar dedicado a transporte, intensidad energética del sector industrial, y las emisiones de CO₂ por la generación de energía eléctrica. En la Tabla 9 se presenta los indicadores usados y la forma como se establecieron sus valores

Tabla 9

Método de obtención para los indicadores Desarrollo Energético Sustentable del estado de Quintana Roo, México

| Dimensión | Indicador | Método de obtención |
|------------------|---|---|
| Social | Acceso a la energía eléctrica | Hogares con electricidad/ hogares totales |
| Económico | Consumo energía per cápita | Energía consumida/ cantidad total habitantes de Quintana Roo |
| Económico | Consumo energía por unidad de PIB | Energía consumida/ PIB de Quintana Roo |
| Económico | Porcentaje del ingreso económico en el hogar dedicado a transporte | Gasto en transporte de hogar/ gasto total de hogares |
| Económico | Intensidad energética del sector agrícola | Energía consumida / PIB del sector agrícola Quintana Roo |
| Económico | Intensidad energética del sector agrícola | Energía consumida / PIB del sector industrial Quintana Roo |
| Ambiental | Emisiones de CO ₂ por la generación de energía eléctrica | Emisiones de CO ₂ por cantidad de energía eléctrica producida en el estado |

Nota: Fuente: (Hernández Rodríguez, y otros, 2016)

El resultado de la evaluación indica un ligero decremento en la sostenibilidad del sistema energético en el estado de Quintana Roo en el periodo estudiado y los autores destacan la importancia de seleccionar fuentes de información debido a las discrepancias entre las bases de datos oficiales.

El trabajo titulado Indicadores de sostenibilidad de las termoeléctricas en la Amazonía: estudio de caso en Rondônia (Torres do Amaral, De Souza, & Carvalho, 2021) presenta una metodología para analizar la sostenibilidad de la generación de energía en el estado de Rondônia

en Brasil mediante la estimación de los indicadores ambientales, sociales y económicos basados IEDS y se evalúa el Índice General de Sostenibilidad (IGS) realizando encuestas electrónicas a las empresas de distribución de electricidad y consultando documentos oficiales. Se identificaron 25 sistemas aislados de generación en operación en 52 municipios. Las variables se clasificaron en tres niveles 1,0 valor máximo (mayor sostenibilidad), 0,5 valor intermedio y 0,0 valor mínimo, se calculó el promedio de los indicadores y el IGS se elaboró con base en el promedio de la suma de los indicadores de cada dimensión, cada una contribuye un 33% al resultado final. Los niveles de sostenibilidad de acuerdo con el IGS se muestran en la Tabla 10

Tabla 10
Niveles de sostenibilidad de los sistemas de microrredes en el estado Rondônia

| IGS | Clasificación |
|----------------------|----------------------|
| $IGS > 0,8$ | Alto |
| $0,8 \geq IGS > 0,6$ | Promedio |
| $0,6 \geq IGS > 0,4$ | Bajo |
| $IGS \leq 0,4$ | Revisar |

Nota: Fuente: (Torres do Amaral, De Souza, & Carvalho, 2021)

En el Anexo 9 se muestran los indicadores seleccionados por estos autores para evaluar la sostenibilidad de la generación de energía en zonas aisladas. El resultado del IGS demostró la baja sostenibilidad de los sistemas de generación de electricidad a partir de combustibles fósiles instalados en el estado en las tres dimensiones, esto significa que estos sistemas no contribuyen al desarrollo social local y no impactan positivamente en temas como la salud, la generación de empleo y la educación. La investigación propone la necesidad de adoptar un modelo de microrredes de generación sostenible que integren a las comunidades y la creación de ingresos, así como, la divulgación de los planes de acción y mitigación involucrando a la sociedad en la prevención de los desastres ambientales. Finalmente, se identifica la prioridad de sustituir las centrales térmicas por fuentes de energía que utilicen recursos renovables que brinde mayores y mejores condiciones en las tres dimensiones de la sostenibilidad.

6.1.2 Contexto de la generación de energía fotovoltaica

El artículo escrito por Delfanti et al (2016) se basa en los datos oficiales del crecimiento de campos fotovoltaicos en la región italiana del mediterráneo en tierras rurales y su impacto en la degradación ambiental y el contexto socioeconómico local. Los impactos positivos identificados son la generación de energía, la diversificación de fuentes de energía, reducción de emisiones de GEI, diversificación en los ingresos de los propietarios de las tierras y durante temporadas de baja productividad agrícola proporcionan beneficios económicos a los dueños. No obstante, los impactos negativos la degradación del paisaje, del suelo, la ocupación de tierras, la pérdida de tierras de cultivo tradicionales y de la biodiversidad, aunque, la falta de investigación de estos impactos dificulta su análisis a nivel regional, nacional y global.

Para el caso de Italia en el 2012, fue el segundo país con mayor capacidad instalada de plantas fotovoltaicas. Sin embargo, la conversión de tierras de cultivo de alta calidad en parques solares afectó la producción de alimentos y el valor paisajístico de la región rural. Por este motivo, las institucionales nacionales han establecido algunos límites al desarrollo de estas instalaciones.

En la revisión literaria, se destaca la necesidad de estrategias de gestión eficaces y políticas para preservar las tierras del sur de Europa de las instalaciones no planificadas de generación solar fotovoltaica montada en el suelo (GM-PV) que pueden generar una degradación ambiental. Por lo anterior, los autores proponen un enfoque basado en indicadores para evaluar la expansión de los parques solares considerando la topografía, el uso de suelo y la demografía en contexto socioeconómico de la comunidad local. Los cinco indicadores seleccionados para el estudio son (I) Altitud media (m), (II) densidad de población para 2007 (habitantes /km²), (III) variación porcentual de la densidad poblacional entre 2007 y 2014, (IV) superficie total administrada por cada municipio (km²) y (V) una variable binaria que distingue los municipios del sur de Italia (1) de los municipios del centro y norte de Italia (0) y dos variables que evalúan el porcentaje de superficie de campos fotovoltaicos montados en tierra en la superficie total municipal entre el 2007 - 2014.

Los autores realizaron un Análisis de Componentes Principales (ACP) para identificar la relación espacial entre las variables contextuales seleccionadas y el área porcentual de los campos fotovoltaicos GM. Los resultados muestran la redistribución de los campos GM-PV, con

disminución en el sur de Italia y aumento en el norte y centro del país, concentrándose principalmente en áreas planas en el periodo estudiado, lo que aumenta los impactos negativos ya que estas áreas experimentan una mayor actividad humana en las zonas marginales económicamente y montañosas. Se recomienda para reducir el impacto utilizar tierras ya degradadas contaminadas o marginales que no podrían sustentar poblaciones viables de vida silvestre o de producción agrícola y realizar investigación sobre el uso combinado de la generación de energía y la agricultura, considerando el impacto en los paisajes naturales de la región mediterránea.

El artículo Paiano, Lagioia, & Ingraio (2023) resalta el rápido crecimiento del mercado fotovoltaico en Italia, con una generación de electricidad superior a 25 TWh en 2021 y los gobiernos avanzan hacia una mayor inversión en investigación de ER y con dos objetivos de: acelerar la consecución de la paridad de red, es decir, el equilibrio de costos entre la energía producida por fuentes renovables y la energía comprada a la red; y hacer que las inversiones privadas sean asequibles incluso en ausencia de apoyo gubernamental.

Los autores analizan la conveniencia de invertir en un sistema solar fotovoltaico residencial de 3kW, en Italia. Proporcionan un conjunto de indicadores para evaluar su rendimiento multidimensional con un enfoque holístico e integrado, basado en la revisión bibliográfica de las instalaciones fotovoltaicas. Algunas de las recomendaciones encontradas son: no se debe asumir que los sistemas FV son cero emisiones donde las fases de mayor impacto son la producción y el final de la vida útil y varían según la tecnología empleada, realizar la evaluación de los indicadores a través de la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida. La huella de carbono depende de los parámetros de diseño como la irradiación solar, la vida útil, la eficiencia, y la relación de rendimiento y la evaluación de la viabilidad de un proyecto FV debe tener en cuenta la ubicación del proyecto, el contexto del país, la tecnología empleada, el lugar de la fabricación.

Los autores concluyen que no existe una integración de las dimensiones de la sostenibilidad al evaluar los proyectos fotovoltaicos y su enfoque principal es la parte económica y financiera de los proyectos. El sistema FV residencial analizado es viable y el modelo de evaluación propuesto es aplicable a nuevos proyectos. Sin embargo, destacan la necesidad de realizar futuras investigaciones para mejorar el rendimiento ambiental, reducir el uso de materiales peligrosos y el almacenamiento de energía. Los parámetros del sistema FV estudiado están relacionados en la

Tabla 11 y los resultados de la evaluación en la Tabla 12. El cálculo de los indicadores se encuentra en el Anexo 10, basado en la revisión bibliográfica realizada por los autores.

Para el año 2015, se realiza un estudio el cual tiene por objetivo realizar una revisión sistemática y un metaanálisis de las métricas de energía integrada como son el EPBT y EROI (Bhandari, Collier, Ellingson, & Apul, 2015) para las tecnologías fotovoltaicas módulos c-Si (mono-Si y poli-Si) y de película delgada (Cadmium Telluride CdTe, Cooper Indium Gallium Diselenide CIGS y Amorphous Silicon a:Si). Por las tasas de crecimiento de la capacidad de energía fotovoltaica a nivel mundial y el gran número de estudios publicados hasta el momento sobre las dos métricas más comunes para comprender el rendimiento energético de esta tecnología, los autores tuvieron en cuenta 232 referencias. En palabras de los autores “la EPBT determina el tiempo que debe funcionar una planta fotovoltaica antes de recuperar la energía invertida a lo largo de su vida útil” y “el EROI nos dice cuánta energía se obtiene de un sistema de una fuente de energía en comparación con la cantidad de energía que se requiere para crear e implementar el sistema” estos dos indicadores se relacionan con los parámetros de eficiencia del módulo, irradiación solar y vida útil del sistema los cuales afectan el rendimiento del sistema FV en su ciclo de vida.

El estudio mostró que la energía incorporada reportada en la literatura varía mucho con un mínimo de 894 MJ/m² para película delgada hasta 13.428 MJ/m² para silicio monocristalino. La media armonizada de EPBT varió de 1,0 a 4,1 años; de menor a mayor, los tipos de módulos se clasificaron en el siguiente orden: telurio de cadmio (CdTe), diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS), silicio amorfo (a:Si), silicio policristalino (poli-Si) y silicio monocristalino (mono-Si). El EROI armonizado la media varió de 8,7 a 34,2. Entre los diferentes tipos de energía fotovoltaica, la variación en la energía integrada fue mayor que la variación en la eficiencia y la relación de rendimiento, lo que sugiere que la clasificación relativa de la EPBT de las diferentes tecnologías fotovoltaicas actuales y futuras depende principalmente de su energía integrada y no de su eficiencia”.

En la búsqueda de la eficiencia energética por su impacto en la sostenibilidad de la energía ya que al emplear una menor cantidad de energía para producir o fabricar un módulo solar o sus componentes asociados a un sistema FV se traduce en una menor emisiones de GEI. Por este, motivo y con relación a la ubicación geográfica de Colombia respecto a la línea ecuatorial es importante conocer como es el rendimiento de los módulos fotovoltaicos en climas tropicales.

Tabla 11

Parámetros clave de la planta fotovoltaica estándar de 3Wp prediseñada para aplicaciones domésticas.

| Ubicación y coordenadas | Inclinación y orientación | Tipo de sistema | Tecnología | Irradiación solar (Irr) | Área (m ²) | Potencia nominal (kW _p) | Producción de electricidad esperada (kWh/año) | Vida útil (n) (años) | Disminución del rendimiento (% /año) | Eficacia (%) |
|--|---------------------------|---|------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|---|----------------------|--------------------------------------|--------------|
| | | | | (kWh/m ² /y) | | | | | | |
| Roma Latitud:41°90'3" Norte Longitud:12°49'6" Este Elevación: 65 m s.n.m. | 36 (opto) ° 0 ° | Azotea residencial conectada a la red Integrada | c-Si | 1928 | 17.2 | 3 | 4350 | 25 | -1 | 17 |

Nota: Fuente: (Paiano, Lagioia, & Ingraio, 2023)

Tabla 12

Resumen de los indicadores evaluados en el estudio de un sistema FV residencial de 3 kW

| Dimensión | Indicador | Método de obtención | Unidad | Resultado |
|------------------------|--|--|--------------|-----------|
| Energía | Tiempo de Recuperación de la Energía (EPBT) | $EPBT = (E_{in} \div E_{AOUT(EL)}) \div \eta_G$ | Año | 1,35 |
| | Retorno de la Inversión Energética (EROI) | $EROI_{PE-eq} = EROI_{EL} \times (1/\eta_G)$ | - | 7,05 |
| Medioambiental | Potencial de Mitigación del Impacto Ambiental (EIMP) | $EIMP_{CC} = (\gamma_G \times E_{OUT}) - CC_{in}$ | kg de CO2 eq | 23.215 |
| | Coste Nivelado de la Energía (LCOE) | $LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n [C_t \times (1+r)^{-t}]}{\sum_{t=1}^n P \times (1+r)^{-t}}$ | €/kWh | 0,15064 |
| Económico - financiero | Valor Actual Neto (VAN) | $VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t}$ | € | 2881 |
| | Período de recuperación de la inversión (PBP) | $PBP = A + \frac{ B }{C}$ | Año | 8,26 |

Nota: Fuente: (Paiano, Lagioia, & Ingraio, 2023)

Un estudio titulado “Una revisión de las tecnologías de módulos fotovoltaicos para aumentar el rendimiento en climas tropicales” (2017) revela que en los módulos el rendimiento disminuye en climas tropicales por factores como la temperatura de la célula, la velocidad del viento y la humedad relativa. Estos afectan negativamente a los índices de rendimiento del módulo, que incluyen la potencia de salida (PO), la eficiencia de conversión de energía (PCE) y el tiempo de recuperación de la energía (EPBT). Según la investigación realizada los módulos fotovoltaicos que operan en los trópicos poseen tasas de falla más altas que los de climas templados. Los modos de falla observados en el campo incluyen la delaminación y la decoloración del EVA, la degradación y el agrietamiento de la unión de la soldadura y la cinta, así como las marcas de quemaduras, en consecuencia, el costo de mantenimiento aumentaría.

Basados en los resultados los autores recomiendan la aplicación de las células FV de película delgada de CdTe por su mejor rendimiento en climas tropicales, el EPBT es corto de aproximadamente 8 meses comparado con las comerciales y tiene el costo es bajo de aproximadamente \$0.7 / W respecto a las comerciales y cercano al costo de fuentes de energía de combustibles fósiles de \$0.5 /W. En el Anexo 11 se presenta la comparación de las características relevantes de las células FV comerciales estudiadas.

En 2023 se realiza un estudio donde se evalúan dos tecnologías de FV el silicio monocristalino y el tándem silicio/perovskita comparando solamente las emisiones de GEI empleando la metodología de Evaluación del Ciclo de Vida (ACV o LCA) teniendo en cuenta la estrategia Nacional Baja en Carbono para Francia donde se define lograr la neutralidad en 2050 Los autores para este estudio construyen un SOS global (SoSOS) a lo largo del tiempo para el indicador de cambio climático en dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) con respecto a unidad de producción de electricidad (1kWh) y pueda ser comparable. Para realizar la evaluación emplearon la recopilación de datos del gobierno francés y se apoyaron en la publicación de 2021 de El Réseau de Transport d'Electricité (RTE), el operador del sistema de transmisión de electricidad en Francia para obtener los 7 escenarios. (Riondet, Rio, Perrot-Bernardet, & Zwolinski, 2023)

Riondet et al (2023) presentan un sistema fotovoltaico compuesto por la parte activa (el módulo) y los componentes del equilibrio del sistema (BOS) que son la estructura, cables, inversor, transformador, entre otros se integran para gestionar las restricciones mecánicas y eléctricas. Se presentan las 5 etapas genéricas del LCA siguiendo los estándares, aunque para este estudio solo

se consideran las primeras 4 etapas, ya que no tienen en cuenta la etapa fin de vida útil o EoL por la falta de datos por ser un tema relativamente nuevo. Las etapas consideradas son las siguientes:

1. Extracción y purificación de materia prima (por ejemplo, producción de silicio de grado metalúrgico)
2. Conversión de materia prima en material (por ejemplo, producción de silicio para redes solares)
3. Producción y ensamblaje de componentes (por ejemplo, producción de obleas y ensamblaje de células en módulos)
4. Uso y mantenimiento de la instalación
5. Tratamiento de fin de vida útil -EoL (Por ejemplo, recuperación de energía o reciclaje parcial de cobre, aluminio, etc)

En el análisis de las dos tecnologías, se evaluaron dos parámetros la vida útil y la eficiencia energética. En la Tabla 13 se encuentra el resumen de los resultados del estudio.

Tabla 13
Tecnologías evaluadas

| Parámetro | Silicio Monocristalino (c-Si) | Tándem Silicio/Perovskita: |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Vida útil | 10 a 30 años | 30 años |
| Eficiencia energética | 20.5% | 28% |
| SoSOS (Emisiones de CO ₂ eq para producir 1kWh) por debajo del objetivo de neutralidad de carbono | 2020 | No se encuentra a escala industrial |
| SoSOS (Emisiones de CO ₂ eq para producir 1kWh) por encima del objetivo de neutralidad de carbono | 2040 | 2040 |
| Considerarse sostenible | 2040 | 2045 |

Nota. Fuente (Riondet, Rio, Perrot-Bernardet, & Zwolinski, 2023)

Los autores concluyen que las tecnologías actuales deben buscar satisfacer las necesidades de sostenibilidad a lo largo de la vida útil y de los objetivos planteados en materia de sostenibilidad y si no se es posible se debe investigar otras tecnologías que permitan mantener a lo largo de su vida útil los objetivos de bajas emisiones y también se debe considerar en un corto plazo la investigación y las acciones necesarias para la etapa EoL ya que no existen un consenso sobre el modelo de esta etapa y los diseñadores no lo tienen presente en el desarrollo de sus proyectos y este último aspecto no es insignificante en las emisiones de CO₂eq y no debe ser ignorado en un contexto de transición energética. Finalmente, recomiendan realizar nuevos estudios donde se

deben integrar todos los sistemas como el almacenamiento de energía, la red de distribución porque cada vez más los sistemas PV están más integrados a la red eléctrica nacional.

El estudio realizado por Huber & Steininger (2022) titulado “Cuestiones críticas de sostenibilidad en la producción de electricidad eólica y solar, así como instalaciones de almacenamiento y posibles soluciones”. Se centra en los riesgos asociados con los elementos de cadena de suministro para la producción de baterías de iones de litio, paneles solares, turbinas eólicas, y vehículos eléctricos como lo son los minerales de conflicto, los tres elementos de tierras raras (REE) como el praseodimio, disprosio y neodimio, también el cobalto y el litio por estar relacionados con temas de conflictos, corrupción y riesgos para la salud. En el Anexo 12 se resumen los elementos analizados en el estudio y los problemas de sostenibilidad asociados a ellos.

Para abordar estos problemas, se han propuesto soluciones como las regulaciones para que las empresas gestionen su cadena de suministro y realizar seguimiento a las importaciones de minerales. Por ejemplo, en Estados Unidos, la "Ley Dodd-Frank 1502" en 2010 y los Principios de la OCDE para la Debida Diligencia para Promover Cadenas de Suministro Responsables para Conflictos y Minerales en Zonas de Alto Riesgo", en 2011. Además, la Unión Europea publicó el «Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen obligaciones de diligencia debida en materia de suministro para los importadores de la Unión de estaño, tantalio, wolframio, sus minerales y oro procedentes de zonas de conflicto y de alto riesgo», en 2017.

Sin embargo, la cadena de suministros es muy amplia y quienes realizan dichas acciones ilegales tienen redes por las cuales reestructurar el proceso de suministro. Por lo tanto, a través de la gobernanza se ha tratado de articular con las grandes empresas de la industria acuerdos que permitan reducir el suministro de estos materiales de los países llamados conflicto, no solo la República del Congo, ni los países vecinos si no los demás países del mundo con afectaciones directas la violación de derechos humanos, de contaminación ambiental y demás afectaciones a la sostenibilidad en los procesos de explotación.

El uso de tierras raras, cobalto y litio en tecnologías renovables es muy relevante y se prevé que aumente sustancialmente para 2040. Sin embargo, estos recursos minerales no son infinitos y no puede reproducirse, lo que eventualmente causa que los recursos minerales se agoten.

Para mitigar los problemas de sostenibilidad asociado se han planteado sustitutos para los REE, los minerales del conflicto y otros elementos críticos y a veces se pueden utilizar sustitutos sin necesidad de hacer mucho o ningún cambio en el diseño.

Los posibles sustitutos del estaño incluyen el aluminio, el vidrio, el papel y el plástico. Igualmente, se han realizado varias investigaciones para encontrar sustitutos del estaño y así como para otros minerales. Otro mecanismo como es el reciclaje, lo que busca extraer menos minerales nuevos. Además, el reciclaje podría reducir las emisiones causadas por la extracción y el material ya utilizado sirva de materia prima en la fabricación de nuevos elementos necesarios en la industria de la generación de energía renovable; aunque apenas se ha empezado a estudiar sobre el tema. La sostenibilidad en la producción de energía renovable requiere la gestión responsable de la cadena de suministro y la investigación de alternativas para estos recursos necesarios y finitos.

La investigación adelantada por (González Posso, 2023) aborda la presión generada en los mercados de minerales necesarios para las tecnologías de la transición, especialmente la energía fotovoltaica. La nueva ola de minería para la transición ha prendió las alertas para afrontar y mitigar los impactos de la extracción a gran escala en los ecosistemas locales, incluyendo la deforestación, degradación del suelo y contaminación del agua. Además, de los conflictos de la gran minería con las comunidades locales, muchas veces obligadas al desplazamiento, a conflictividades violentas y tratos injustos en cuanto a la participación de los beneficios económicos.

El autor hace referencia al informe publicado por el Washington Post (2023) muestra que Europa y Estados Unidos dependen de las reservas en África, Latinoamérica, China, Australia e Indonesia para los elementos de almacenamiento de energía. En la Tabla 14 se muestran donde se encuentra las principales reservas. El autor resalta que la distribución de reservas de materias primas críticas lleva a la disputa entre multinacionales interesadas en garantizar el control para su beneficio y describe los problemas sociales y ambientales de la minería crítica en Guinea, Congo, Gabón y América Latina.

Tabla 14
Minerales para acumular energía, reservas por países. 2023

| Mineral crítico para baterías de vehículos y para acumular energía renovable | Principales reservas (significan más del 85%) |
|---|---|
| Litio | Australia, Cono Sur LA, China |
| Bauxita (para aluminio) | China, Australia, Guinea, Brasil, India, Indonesia |
| Manganeso | Sudáfrica, Australia, Gabón, China |
| Cobalto | Congo (75%), Rusia, Indonesia y Australia |
| Níquel | Indonesia, Filipinas, Rusia, Canadá, Australia, China, Brasil |

Nota. Fuente: (González Posso, 2023)

El reciclaje de los módulos solares y elementos asociados a la energía solar es un tema crucial para garantizar la sostenibilidad de la tecnología. Varios estudios se han realizado en los últimos cinco años.

En el artículo de 2022 “Revisión sobre el reciclaje de módulos/paneles solares” (Divya, Adish, Kaustubh, & Zade) los autores en sus palabras concluyen “En la próxima década, los residuos generados debido a la tecnología solar van a aumentar exponencialmente y el mundo debería estar preparado para abordar ese problema para que la tecnología solar no resulte ser prohibida en la sociedad al igual que el plástico.” y recomiendan que los fabricantes sean responsables de la recuperación de materiales de los paneles solares fotovoltaicos

Wang et al (2023) indican que China lidera la producción mundial de módulos FV y es el país con mayor generación de energía fotovoltaica, por tal motivo China se enfrentara al desafío del desmantelamiento de un gran número de módulos solares y la gestión adecuada al final de la vida útil de estos es una parte importante para lograr un desarrollo sostenible y ecológico de la generación de energía solar. El estudio identifica cinco perspectivas claves para el reciclaje que son tecnología, economía, políticas, regulaciones y estándares, y entorno industrial. En la siguiente tabla se resumen los 11 obstáculos identificados.

Tabla 15
Resumen de los obstáculos para el reciclaje de módulos fotovoltaicos.

| Categoría | Obstáculo |
|---|---|
| Barrera técnica | Dificultades para desmontar y separar los componentes de los componentes al final de su vida útil (TB_Diff_Dis) |
| | El proceso de tratamiento es propenso a la contaminación secundaria (TB_Sec_Poll) |
| | No puede realizar trabajos de reciclaje en lotes durante mucho tiempo (TB_Long_Tim) |
| Barrera económica | Alta inversión inicial, largo período de amortización (EB_Hi_Inv) |
| | Altos costos logísticos (EB_Logis) |
| | Alto costo de eliminación y bajo valor de reciclaje (EB_Disp) |
| Barrera de Políticas, Regulaciones y Estándares | Faltan criterios de recuperación (PRSB_Mis_Crite) |
| | Falta de incentivos (PRSB_Lac_Ince) |
| | Sistema Regulatorio Imperfecto (PRSB_Im_Regul) |
| Barreras del entorno industrial | Menor tamaño del mercado y menor entusiasmo de las empresas (IEB_Sma_Mar) |

| Categoría | Obstáculo |
|-----------|---|
| | Infraestructura incompleta y cadena industrial imperfecta (IEB_Chain) |

Nota. Fuente: Análisis de las barreras para el reciclaje de módulos fotovoltaicos de residuos chinos en el contexto del "doble carbono" - ScienceDirect

Li et al (2023) evalúa los costos y beneficios para las tecnologías de reciclaje de los módulos fotovoltaicos empleando las metodologías de Costo del Ciclo de Vida (LCC) y el análisis del Ciclo de Vida (ACV), respectivamente, Las tecnologías de recuperación analizadas son reciclaje mecánico (MR), el reciclaje químico (CR) y el reciclaje térmico (TR) para los módulos fotovoltaicos de c-Si. Los resultados obtenidos en palabras de los autores en relación con los vertederos que causan altas cargas para el clima, el agua y la salud humana, todas las tecnologías de reciclaje pueden aliviar las cargas ambientales hasta cierto punto. Entre las tres tecnologías de reciclaje, el tratamiento térmico tuvo ventajas sobre los otros dos tratamientos, generando más beneficios ambientales porque recuperó más metales para reemplazar la producción virgen y generó menos emisiones contaminantes durante el reciclaje.

Es importante resaltar que la viabilidad económica del reciclaje depende no solo de los costos económicos tradicionales, sino también de los beneficios externos, ya que el medio ambiente y la salud pública son más importantes que el dinero.

Aunque estos resultados deben verificarse porque las tecnologías de reciclaje aún no están a escala industrial y se recomienda incentivar a la sociedad de China a reciclar los residuos fotovoltaicos por los beneficios económicos indirectos, como el aumento del empleo y el ahorro de energía. En el Anexo 13 se encuentra la tabla resumen de la evaluación del impacto del ciclo de vida y de los costos económicos y beneficios del ciclo de vida del reciclaje para los residuos fotovoltaicos.

En 2022, se revisa la aceptación pública de la ubicación de los parques solares para la producción de energía solar a gran escala en las tierras agrícolas en el Medio Oeste de Estados Unidos en Michigan (Moore, Graff, Ouellet, Leslie, & Olweean), y la interacción de las partes interesadas. El resultado de la investigación es el desarrollo de un mapa conceptual donde identificaron aspectos generalizables de la interacción de las partes interesadas (ver Anexo 14) por medio de una metodología de entrevistas. Los autores identifican tres ámbitos que influyen en estos sistemas agrovoltáicos como son el ámbito político, social y científico que influyen sobre la toma de decisiones y la aceptación pública de estos sistemas y concluyen que para hacer posible la

agrovoltaica, se requiere de una colaboración entre agricultores, desarrolladores solares, las empresas de servicios públicos y los investigadores para planificar y realizar acuerdos para poder cubrir las necesidades particulares o del contexto propio del lugar ya que si estos sistemas no se adaptan a las necesidades de las partes interesadas tienen alta probabilidad de fracaso.

Finalmente, recomiendan realizar estudios sobre cómo las economías agrícolas locales y la producción de alimentos se ven afectadas por la conversión de tierras agrícolas de primera calidad frente a la de no primera calidad. Y generar una profunda colaboración intersectorial e interdisciplinaria que ayude a habilitar estas soluciones para garantizar que mejoren la equidad de la ubicación solar en tierras agrícolas, teniendo sistemas socio-agrivoltaicos.

Con motivo de una mejora continua y de maximizar los impactos sociales y ambientales de los nuevos desarrollos solares la Unión Española Fotovoltaica UNEF (2022) ha publicado la “Guía de mejores prácticas para el desarrollo de plantas solares” donde exponen las mejores prácticas disponibles en integración social y ambiental a las que deben adaptarse los nuevos desarrollos solares fotovoltaicos para cumplir con los objetivos de energías renovables y reducción de emisiones de carbono establecidos en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030, maximizar su contribución al desarrollo económico y social de las comunidades locales y minimizar su impacto ambiental mediante su integración en los entornos naturales donde se implantan.

Los autores presentan una propuesta de Metodología para la Creación de Valor Compartido entre los proyectos fotovoltaicos y las comunidades locales, también se muestra un banco de mejores prácticas y casos exitosos de proyectos renovables en España.

El elevado volumen de proyectos de plantas renovables genera una mayor exigencia de suelo para su instalación y el impacto sobre otras actividades económicas del territorio y el sobre el entorno natural, por esto se genera el concepto de licencia social, que se define como el respaldo, apoyo o legitimidad que otorga el conjunto de la opinión pública a una empresa o un sector.

Se requiere que los proyectos apliquen principios de creación de valor compartido para tratar de generar valor económico sostenible para las empresas promotoras a la vez que un retorno social positivo directo para las comunidades en las que se implanta. Para generar valor compartido se debe generar un análisis previo revisando el contexto social, económico, geográfico y ambiental de la comunidad local. Después de analizar el contexto, se deben identificar los distintos grupos

sociales presentes en la comunidad e iniciar una escucha activa con ellos y generar un diálogo para conocer sus preocupaciones y posición frente al proyecto.

Posteriormente del diálogo se debe definir un plan de acción para incluir las medidas dirigidas a crear valor compartido entre la empresa promotora del proyecto y las comunidades locales, con objetivos claros y concisos, planes de trabajo y cronogramas que faciliten la implementación de las actividades, el seguimiento y la evaluación de la ejecución y los resultados.

Este plan debe definir su alcance financiero y geográfico, siempre desde un enfoque flexible y ajustado a cada momento del estado del proyecto. Para la medición, monitorización y mejora continua se deben usar indicadores tanto cuantitativos como cualitativos, como: empleo generado; inversión en empresas locales; donaciones para mejora de dotaciones municipales, centros de mayores y similares; número de árboles plantados; calidad del empleo creado (empleo femenino, empleo de larga duración); número de asistentes a los cursos de formación realizados, número de hectáreas destinadas a la protección de la biodiversidad, etc. Aunque las características pueden variar según el territorio involucrado, siempre se deben realizar evaluaciones y autoevaluación para estar con una mejora continua del plan.

Los tres ejes que vertebran el contenido del plan de creación de valor compartido se definen sobre cada uno de los principios ESG (Environmental Social Governance) en los que se construye la sostenibilidad: integración ambiental, integración social y gobernanza.

La UNEF plantea las siguientes mejores prácticas de la integración ambiental:

1. La selección del emplazamiento debe evitar áreas sensibles desde el punto de vista ambiental y considerar la percepción de la comunidad sobre su entorno natural.
2. Se deben introducir elementos que fomenten la biodiversidad.
3. Minimizar el impacto durante la construcción.
4. Minimizar el impacto durante la operación y mantenimiento.
5. Se debe evitar el uso de agua limpia para limpieza y si se emplea se debe reciclar sin productos químicos.
6. Reducir la huella de carbono donde se puedan emplear vehículos eléctricos para las operaciones de mantenimiento.
7. Planes de restauración ambiental en el entorno de la instalación.

8. Fin de vida útil y desmantelamiento realizar planes de desmantelamiento, reciclar los materiales y el restablecimiento del esta original del terreno.

Las mejores prácticas para maximizar el impacto social positivo son:

1. Formación profesional y generación de empleo en diferentes etapas del proyecto:
2. La generación de empleo indirecto que debe ser explotado en la fabricación de componentes y la prestación de servicios.
3. La priorización de compra de equipos y componentes de fabricación o proveedores nacionales.
4. La contratación local de otros bienes y servicios como por ejemplo transporte, alojamiento, catering, etc.
5. Donde se ubican los proyectos un incentivo de reducir el precio de la energía, aunque por temas regulatorios no sea pueda hacer directamente si se pueden fortalecer medidas como las instalaciones de autoconsumo, instalaciones de recarga de vehículo eléctrico, y la renovación de equipos de lugares de interés público que sean más eficientes energéticamente.
6. Participación en ayudas económicas para beneficiar directamente a la comunidad por medio
7. La creación de programas de turismo de tipo energético.
9. Las zonas en las que se ubican las instalaciones fotovoltaicas suelen tener una predominancia del sector primario: agricultura, ganadería, apicultura, etc. Siendo así, se debe evitar que las personas y los grupos dedicados a estas actividades pueden ver en el desarrollo fotovoltaico una amenaza para su modo de vida.

La gobernanza y ética empresarial son importantes algunas medidas para una relación transparente y dialogada con la comunidad local y los grupos sociales.

1. Análisis del contexto de la comunidad donde se ubicará la instalación para poder diseñar acciones de impacto social y económico que correspondan a atender las necesidades reales de la comunidad local.
2. La transparencia, divulgación y dialogo.

3. Esta transparencia y espíritu divulgativo se debe mantener durante toda la vida del proyecto, especialmente durante su desarrollo y construcción.
4. La creación de observatorios u otro tipo de iniciativas juntamente con instituciones académicas y/u organismos técnicos de ámbito local o autonómico para reforzar la percepción de transparencia del proyecto.
5. La firma de acuerdos y compromisos con la administración local y de convenios de colaboración con grupos sociales representativos.
6. La expropiación forzosa, su recurso debería evitarse en la medida de lo posible. Esta medida debería emplearse solo como último recurso y con el único fin de evitar comportamientos especulativos, aunque la Declaración de Utilidad Pública (DUP) lo permite.
7. Proponer preventivamente una mediación dirigida a evitar potenciales conflictos, o bien activarla de manera reactiva una vez estos conflictos se pongan de manifiesto.
8. Con la implantación territorial de las instalaciones, es clave conocer y poder presentar con transparencia la cadena de valor de fabricación de los componentes que compondrán la instalación.

Por último, los autores plasman casos de éxito de acuerdo con las experiencias de los proyectos en España que han incorporado los principios de integración social y ambiental.

6.2 Contexto Colombiano

La Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME, en la publicación “Proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica julio de 2023 diciembre 2050” (2023) expone que el sistema eléctrico colombiano cuenta con una estructura hidrotérmica importante, aunque proyecta un aumento significativo de generación con fuentes renovables de energía no convencionales especialmente eólica, solar y biomasa con el objetivo de diversificar la matriz eléctrica nacional con un sector más sostenible y una dependencia menor de los fenómenos climáticos y a su vez permitan cumplir los compromisos adquiridos en materia de reducción de emisiones.

La capacidad instalada a junio 2023 se caracteriza por un dominio de las centrales hidráulicas no solo en estructura, sino en generación; en la siguiente tabla se muestra el resumen de la matriz energética nacional.

Tabla 16
Plantas de generación de energía eléctrica

| Tipo de generación | Cantidad de plantas | Capacidad Instalada | Tipo de planta | |
|--------------------|---------------------|---------------------|----------------|----------------------------------|
| Hidráulica | 157 | 12.584 MW | 7% | plantas filo de agua |
| | | | 93% | plantas de embalse |
| Térmica | 56 | 5.009 MW | 42% | Plantas de gas natural |
| | | | 33% | Plantas de carbón |
| | | | 25% | Plantas de combustibles líquidos |
| Solar | 46 | 393 MW | | |
| Eólica | 1 | 18,4 MW | | |
| Biomasa | 18 | 211 MW | | Bagazo y biogás |

Nota. Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2023)

El objetivo del gobierno nacional es el incremento progresivo de las fuentes no convencionales de energía, para suplir el 10% de la demanda, en el corto plazo, y en el mediano y largo plazo es la ampliación de generación para reducir la vulnerabilidad nacional por el cambio climático. El agua es el mayor insumo de generación de energía eléctrica con costos relativamente bajos, aunque el sistema ha enfrentado periodos críticos por los fenómenos climáticos como El Niño o veranos fuertes, poniendo de manifiesto la vulnerabilidad del sistema interconectado nacional (SIN), donde la generación por el componente térmico ha jugado un rol fundamental para garantizar la demanda eléctrica en estos periodos climáticos,

El plan energético nacional para el año 2050 uno de sus objetivos es una matriz de generación evolucionada y que se transforme a una estructura de participación mayoritaria de las fuentes no convencionales de energía en una proporción superior al 43%, mientras la hidroeléctrica el 38% y la térmica un 19%.

Colombia ha impulsado la transición energética con la ley 1715 del 2014. Con la entrada en vigor de la ley 1715 se establece que los sistemas de autogeneración a pequeña escala tienen entrada en el mercado eléctrico colombiano, con esta regulación, se pretende promover el desarrollo de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) en el sector, integrando el mercado eléctrico y participando en las áreas no interconectadas para un desarrollo económico sostenible. Esta norma modificados por la ley 2099 del 2021 (Ley de la transición energética). (Energia.coop, s.f.)

En el gobierno de Colombia de 2018-2022 la política de la transición energética tiene tres objetivos (i) migrar hacia un sistema energético más competitivo, eficiente y resiliente, mediante

la masificación de energías renovables no convencionales y la adopción de nuevas tecnologías; (ii) eliminar las brechas energéticas, introduciendo nuevos modelos de negocio y nuevas tecnologías para acelerar la universalización del servicio de energía eléctrica y gas combustible en todo el territorio; y (iii) liderar la lucha contra el cambio climático, priorizando la movilidad sostenible con la introducción masiva de combustibles de cero y bajas emisiones, el uso de vehículos híbridos y eléctricos, y políticas de eficiencia energética a nivel residencial, comercial e industrial. (Ministerio de Minas y Energía, 2021)

En el gobierno colombiano actual (2022-2026) se ha planteado la hoja de ruta de la Transición Energética Justa (TEJ) donde se promueve y fortalece la implementación de energías renovables con una transformación tecnológica, propicia la transformación productiva del país y esto redundará en un mejoramiento de las condiciones de vida de los colombianos, así como aportar a la mitigación y adaptación al cambio climático, y la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad. La TEJ se basa en cuatro principios (i) Equidad, (ii) Gradualidad, soberanía y confiabilidad, (iii) Participación social vinculante y (iv) Intensiva en conocimiento. (Ministerio de Minas y Energía, 2023)

El director de la UPME indica que existen un mapeo de proyectos de generación de energía de FNCER sobre 20 GW, donde 16329,71 MW son FV y 3991,5 MW eólicos. Para el gobierno nacional antes de finalizar el 2026 se tiene la propuesta de poner en marcha 6 GW en proyectos FV. En 2023 hay 23 proyectos FV para entrar en operación que totalizan 586,3 MW. La ubicación de estos proyectos se puede observar en la Figura 7. (Gubinelli, 2023)

En marzo de 2023, en un comunicado de prensa la UPME asignó la máxima capacidad técnicamente factible de incorporar a la red por 7493 MW de proyectos de generación impulsados por la política energética, donde 5774 MW corresponden a energía solar, donde esta es la principal tecnología en la transición energética del país con 147 proyectos. En segundo lugar, se encuentra la eólica con 1237,8 MW con 10 proyectos y 169 MW de 7 proyectos hidroeléctricos y 1 proyecto de biomasa. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2023)(Santos, 2023)

Figura 7
Proyectos que entrarán en operación en 2023



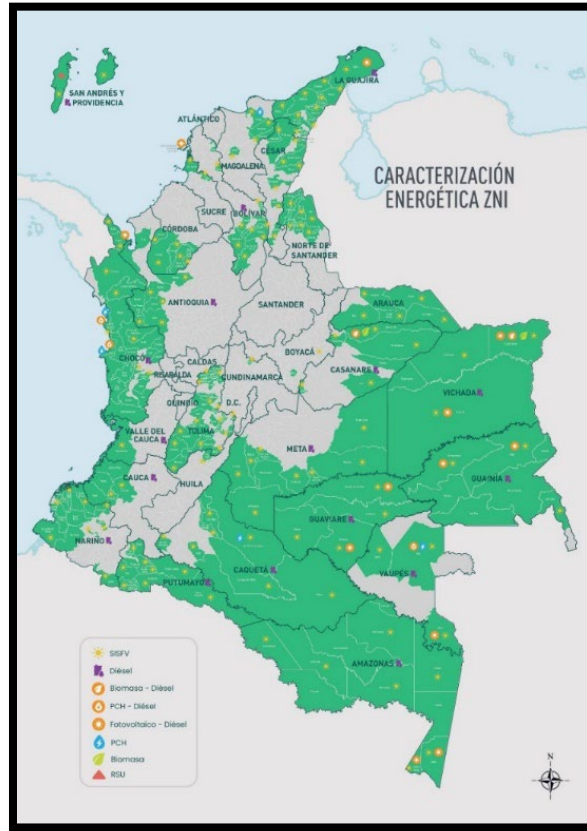
Nota. Fuente: (Gubinelli, 2023)

Actualmente, más del 97 % de la población colombiana accede a la energía eléctrica. Sin embargo, teniendo presente que, cerca de medio millón de hogares aún carecen de este servicio vital en el país. Igualmente, según el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE) revelan que miles de personas en zonas rurales tienen acceso limitado al servicio de energía eléctrica afectando su calidad de vida. (Santos, 2023)

En Colombia, la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en áreas geográficas donde no se puede prestar el servicio a través del SIN por los altos costos, es necesario el servicio de cogeneración y autogeneración. Estas zonas se caracterizan por una presencia baja de densidad poblacional, una ubicación lejana de los centros urbanos, dificultad de acceso y una gran riqueza de recursos nacionales y son conocidas con las Zonas No Interconectadas (ZNI). Las ZNI comprenden alrededor del 66% del territorio Nacional, incluyendo 17 departamentos, 5 ciudades capitales, 54 cabeceras municipales y 1262 localidades. En la Figura 8 es el mapa donde se muestran los proyectos de autogeneración y cogeneración en las ZNI y en la Tabla 17 la matriz eléctrica del ZNI.

Figura 8

Mapa los proyectos de cogeneración en las ZNI de Colombia



Nota. Fuente: Seguimiento a la Infraestructura y Caracterización Energética de las Zonas No Interconectadas (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE), 2023)

Tabla 17

Matriz eléctrica ZNI

| Capacidad total instalada | Capacidad Diésel | Capacidad FNCER | Capacidad por tipo de proyecto FNCER | | |
|---------------------------|------------------|-----------------|--|----------|-----|
| 311439 kW | 262433 kW | 49006 kW | Soluciones individuales solares fotovoltaicas SIFV | 34109 kW | 70% |
| | | | Solar Centralizada | 4734 kW | 10% |
| | | | Biomasa | 4520 kW | 9% |
| | | | Pequeñas centrales hidroeléctricas PCH | 4643 kW | 9% |
| | | | Responsabilidad Social Universitaria RSU | 1000 kW | 2% |

Nota. Fuente: Seguimiento a la Infraestructura y Caracterización Energética de las Zonas No Interconectadas (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE), 2023)

En el reportaje de Carolina Santos (Mercado energético en Colombia: Avances, dificultades y tensiones en la transición, 2023) indica que según el informe del UPME, el consumo energético en Colombia mostró un crecimiento positivo para el año 2021. Igualmente, plasma que el consumo ha aumentado de una forma más rápida que la capacidad de generar energía y la dependencia del recurso hídrico con la llegada del fenómeno del Niño existe la posibilidad el aumento de los precios de energía en el país. Otro punto tratado son las tensiones y desafíos en torno a la ubicación de los nuevos proyectos de inversión en energías renovables especialmente los eólicos y solares en comunidades locales y áreas indígenas. Un ejemplo, es lo manifestado por las empresas de energías renovables y las tribus indígenas ancestrales en La Guajira por la ubicación de los parques eólicos, como el caso de Enel Colombia que anuncio en mayo del 2023 la suspensión indefinida de la construcción del parque Windpeshi, el cual tenía una capacidad proyectada de 205 MW. La Asociación de Energías Renovables (SER) emitió un informe donde destaca que de los 80 proyectos de FNCER programados entre 2023 y 2024, solo el 35 % avanza sin contratiempos con situaciones conflictivas sociales, ambientales o jurídicas.

La UPME a partir del Observatorio de Energía busca recopilar información, informar y hacer seguimiento a las políticas, planes, programas y tecnologías de la transición energética mundial y nacional, de tal manera que se constituya en un referente nacional en la implementación de las tecnologías más adecuadas en la transición en Colombia (Informe de gestión 2021, 2022).

Los indicadores energéticos se encuentran divididos en las tres dimensiones de la sostenibilidad social, ambiental y económicos, (UPME, 2024), se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 18.
Indicadores energéticos UPME

| Dimensión | Indicador | Unidad |
|---|--|--|
| Económica | Uso de energía por unidad de PIB | kWh/\$miles de millones COP |
| | Uso de energía por hogar | kWh/ Hogar |
| | Intensidad energética de la industria manufacturera | kWh/\$PIB Industria |
| | Intensidad energética sector agropecuario | kWh/\$PIB Agropecuario |
| | Intensidad energética sector comercial y público | kWh/\$PIB Comercio |
| | Intensidad energética sector transporte | kWh/\$PIB Transporte |
| | Intensidad energética sector residencial | kWh/ Hogar |
| | Dependencia de energía neta | % |
| Sociales | Porcentaje de hogares sin acceso a energía eléctrica | Encuesta de Calidad de Vida - DANE |
| | | Índice de Cobertura de Energía Eléctrica - UPME |
| | Porcentaje del ingreso que gastan los hogares en energía eléctrica y gas natural | % Ingreso para energía eléctrica total nacional |
| | | % Ingreso para energía eléctrica hogares urbanos |
| | | % Ingreso para energía eléctrica hogares rurales |
| | | % Ingreso para gas natural total nacional |
| | | % Ingreso para gas natural hogares urbanos |
| % Ingreso para gas natural hogares rurales | | |
| Uso de energía doméstica para cada grupo de hogares | No existe información | |
| Ambientales | Intensidad de emisiones del PIB | Toneladas de CO ₂ / \$PIB Industria |
| | Intensidad de emisiones de la industria manufacturera | Toneladas de CO ₂ / \$PIB Industria |
| | Intensidad de emisiones del transporte | Toneladas de CO ₂ / \$PIB Transporte |

Nota. Fuente: (Observatorio de Energía, 2024)

En el artículo de Daniel Medina, presidente de ACIEM, realiza unas afirmaciones sobre la transición energética en Colombia, en sus palabras “según expertos y especialistas, una transición energética posible conlleva un periodo de tiempo de 50 a 70 años, y es importante que el petróleo y el gas natural, en sus fases iniciales, sigan siendo un pilar fundamental para coexistir y respaldar la consolidación de la masificación de las Fuentes no Convencionales de Energías Renovables (FNCER), como la solar, eólica, hidrógeno, biomasa y geotermia, entre otras, en el territorio nacional de forma eficiente y efectiva” y a pesar de los compromisos en reducir las emisiones de GEI, “Colombia no es uno de los países que más contaminan como sucede con las economías industrializadas y más desarrolladas, por lo que se deben revisar las metas para que ni la economía, ni la sociedad, sufran graves impactos y efectos negativos, sin contar con los instrumentos y herramientas para ejecutarlas exitosamente.” (Medina, 2023).

En el libro Seguimiento y análisis de políticas públicas en Colombia 2022, en el artículo de González, A.; Patzy, F. & Peña, J. (2023) examinan las políticas públicas del gobierno nacional del 2018 -2022 en materia de la transición energética y los desafíos del gobierno nacional del 2022-2026. En sus palabras “La falta de una gobernanza incluyente de las energías renovables parece poner en riesgo los planes de escalar estos proyectos. En efecto, el dialogo social no es solo un requisito democrático sino una condición para el avance de las políticas públicas que plantean una agenda de transformación de gran magnitud. Empero, la transición justa no solo se refiere a la gobernanza de la incorporación de nuevas fuentes de energía, sino al manejo del declive en materia de combustibles fósiles.”.

La transición energética implica un cambio estructural en la economía y la sociedad. Esto tiene un efecto en la producción, distribución y consumo del servicio de energía. Por la magnitud del cambio en la vida de las comunidades y ciudadanos, es crucial el dialogo inclusivo que garantice una transición que no amplie las brechas de desigualdad existente.

Los autores concluyen que existe una carencia importante en la gobernanza inclusiva en la agenda de la transición energética, especialmente, en la planeación presenta deficiencias y vacíos en la participación ciudadana. El nuevo gobierno elegido en 2022 se enfrenta el desafío de diseñar un proceso de cambio progresivo de una economía dependiente de los combustibles fósiles, construir una gobernanza adecuada para la transición y debe equilibrar las expectativas sociales, demandas políticas y las necesidades de una economía en reactivación.

En 2023, (Calvo Saad, Solis Chavez, & Murillo Arango) realizaron un estudio para identificar indicadores de desarrollo sostenible relacionados con el sector energético en Colombia. Utilizaron un enfoque AHP (método Analytic Hierarchy Process) y Decision-Making and Multicriteria Decision Analysis (MCDM) para generar un análisis geoespacial y un modelo geoestadístico a través del software QGIS® para determinar los municipios con alto potencial energético de biomasa en Colombia.

Los autores resaltan la importancia de cuantificar la sostenibilidad del sector energético para ello requiere de indicadores que den información precisa sobre la realidad del sector energético de manera simplificada que use estadísticas básicas y con una tabla resumen 10 proyectos representativos que combinan las estrategias MCDM, conceptos de desarrollo sostenible y energías renovables.

El paso a paso seguido por los autores fue realizar una revisión bibliográfica para determinar que indicadores se han establecido para el desarrollo sostenible del sector energético, donde seleccionaron indicadores de sostenibilidad (ver Tabla 19) de la Agencia de Energía Atómica, de otros autores como son Gunnarsdóttir et al., De Lima, Cardoso et al., y Kumar et al. Como criterio de selección tuvieron en cuenta la disponibilidad de información de los organismos especializados IDEAM, DANE, IGAC, UPME y por lo menos un indicador para cada dimensión del DS.

Tabla 19

Indicadores seleccionados para el modelo geoestadístico multicriterio.

| Dimensión | Indicador | Fuente de información |
|------------------|--|--|
| Técnico | Potencial energético de la biomasa (BEP) | UPME, IDEAM, COLCIENCIAS y Universidad Industrial de Santander, (2015). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. (Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia) |
| Social | Zonas no interconectadas (Hogares sin acceso a electricidad comercial) (ZIN) | UPME, https://ipse.gov.co/ |
| | Índice de desarrollo humano (IDH) | Duque, H y Garizado, P. (2020). Colombia: medición del Índice de Desarrollo Humano Municipal. Revista de Economía y Administración. vol. 17 No. 2. (Colombia: Medición del Índice de Desarrollo Humano Municipal) |
| Ambiental | Gases de efecto invernadero (GEI) | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) |
| | Parques Nacionales Naturales (PNN) | IGAC. 2020. Colombia en mapas- áreas protegidas de Colombia. (Colombia en mapas- áreas protegidas de Colombia) https://www.colombiaenmapas.gov.co/# |
| Económico | Indicador de importancia económica municipal (MEII) | DANÉS. 2016. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales/indicador-de-importancia-economica-municipal |

Nota. Fuente: (Calvo Saad, Solis Chavez, & Murillo Arango, 2023)

Después, organizan la información en forma vectorial y la normalizan para cada indicador. Para los indicadores NIZ, IDH, GEI y MEII, la normalización se realizó considerando la escala utilizada por cada entidad que genera la información, y para el GEI interpolaron la escala departamental a la municipal teniendo en cuenta el PIB de cada municipio.

Los autores aplicaron el Análisis Multicriterio e integraron los indicadores seleccionados a los dos escenarios bajo los cuales determinar la idoneidad del uso de biomasa en los municipios colombianos:

1. Escenario I: Percepción profesional/experto: el método empleado fue de ponderación subjetiva del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), los expertos ponderaron cada uno de los indicadores con en una escala de importancia para determinar los pesos de los indicadores y los autores posteriormente organizaron una matriz de ponderación consolidada, calcularon el vector propio para indicar la ponderación de los criterios de comparación y por último, el índice de consistencia, que indica la coherencia entre las respuestas obtenidas y el índice de consistencia CR debe ser inferior al 10%. Para este estudio fue del 8.4%, mostrando que los expertos que participaron en la encuesta fueron consistentes en sus valoraciones de los indicadores establecidos. Así, se pudo continuar con el análisis multicriterio con el método WLC.

2. Escenario II: Acción climática y desarrollo sostenible: El planteamiento de este escenario se basó en las necesidades de desarrollo actuales, en las que se define el cambio climático como el principal problema ambiental a mitigar mediante una adecuada gestión de los recursos y la producción de energía limpia. Los ODS involucrados en este escenario son el ODS 7: energía asequible y no contaminante, seguido del ODS 1: poner fin a la pobreza, el ODS 8: trabajo decente y crecimiento económico, y el ODS 11: ciudades y comunidades sostenibles. Para este escenario utilizaron el método Rank-Sum, el indicador más importante para la aplicación del modelo fue el BEP seguido del GEI.

Finalmente, utilizaron la Combinación Lineal Ponderada (WLC), que permite compensar los indicadores utilizados para cada uno de los escenarios y definir los municipios adecuados cuya ponderación sea $> 0,75$.

La aplicación del MCDM arrojó resultados interesantes que demuestran la idoneidad de la biomasa como alternativa para la generación de energía en Colombia de acuerdo con las características asociadas a su potencial energético, la cantidad generada y el lugar de origen de la biomasa.

El estudio “Retos y perspectivas del uso de la energía solar fotovoltaica en Colombia” (2022) indica la ubicación geográfica de Colombia es un factor importante en la generación de energía alternativa como es la fotovoltaica y utilizar este potencial de generación podría abastecer el aumento de la demanda del servicio de energía por el aumento poblacional, industrial y empresarial de los últimos años, proteger el medio ambiente y el uso eficiente de la energía. El país podría convertirse en una potencia en generación energética sostenible, según la UPME, la radiación promedio anual está en el orden de $4,5 \text{ kWh/m}^2$, donde la media mundial está en $3,9$

kWh/m², adicionalmente, las horas promedio de horas de sol es alto y una buena radiación solar durante todo el año por estar en la zona ecuatorial. En Colombia se han realizado importantes esfuerzos para desarrollar proyectos de sistemas FV, pero está aún lejos de los avances logrados por países como Chile, España, Alemania o México.

Esta investigación identifica que Colombia en los últimos 14 años los proyectos de energía solar han aumentado donde los departamentos líderes son los ubicados al norte del territorio, entre ellos, La Guajira, Atlántico, Cesar y Santander; donde se encuentran registrados más del 50% del total de proyectos actuales.

Los proyectos de energías renovables presentados a la UPME deben completar 3 fases la primera de las cuales corresponde al estudio y análisis de viabilidad técnica y financiera donde se identifican mercados estratégicos que ofrecen atractivas oportunidades de inversión; La segunda etapa corresponde al diseño técnico del proyecto para obtener los permisos, licencias y autorizaciones necesarias para iniciar el proyecto. La última fase corresponde al desarrollo, construcción, montaje e implementación del sistema. Una vez finalizadas estas etapas, se deberán realizar los trámites necesarios para certificar que la planta ha sido diseñada según el proyecto.

En 2023 (González Dumar, Arango Aramburo, & Correa Posada), se realiza un análisis pionero para cuantificar los requerimientos de flexibilidad del sistema eléctrico colombiano a partir de los cambios en la carga neta y sus rampas y considerando escenarios de generación eólica y solar y proyecciones de carga. Ya que se espera que para el 2030, Colombia triplique la capacidad actual instalada de energía solar y eólica por lo tanto es fundamental evaluar la flexibilidad del sistema eléctrico. La flexibilidad del sistema eléctrico es la capacidad de manejar las diferencias entre el suministro y la carga y se puede cuantificar para medir los efectos de las energías renovables en los sistemas de energía. Como conclusión “Se espera que el sistema eléctrico colombiano sea flexible en 2030. Sin embargo, se espera que en 2050 sea menos flexible, ya que la potencia se produciría en exceso aproximadamente en un tercio del año y las rampas de carga neta serían un 70 % más altas que los valores actuales. Se debe priorizar la diversificación de la matriz de generación, ya que la alta dependencia de una sola fuente primaria conduce a la inflexibilidad de los sistemas de energía” y recomiendan realizar trabajos futuros para tener alternativas de flexibilidad, así garantizar la confiabilidad del sistema y la eficiencia del mercado. Sin embargo, enfatizan sobre la necesidad de decisiones políticas y el compromiso del gobierno, ya que tienen el poder de fortalecer o debilitar las soluciones de flexibilidad del sistema eléctrico.

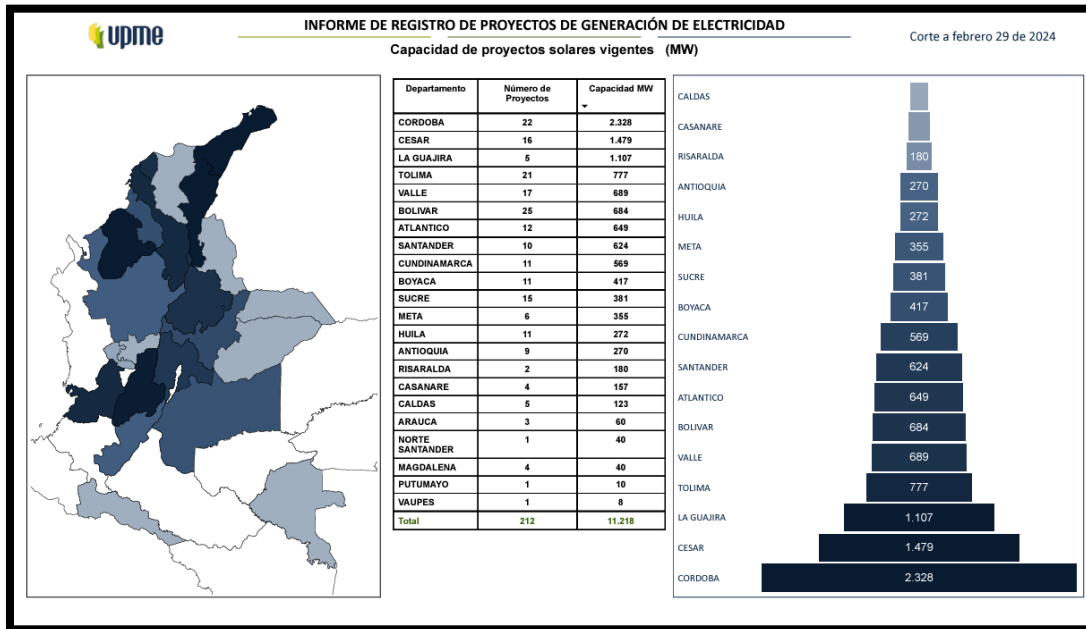
El panorama de la energía solar en Colombia 2023 – 2050 según la UPME, desde 2018 se habían registrado 1.004 proyectos de energía solar fotovoltaica según el corte de mayo de 2023: sumaban 186 vigentes con 9534 MW y 814 prescritos con 16810 MW. Si se asume que antes de 2032 al menos estén en operación instalaciones solares que sumen una capacidad instalada de 10000 MW se estima que la inversión necesaria estará entre US\$15000 y US\$20000 millones de dólares. La mayoría de estos proyectos se encuentran entre territorios étnicos y zonas privilegiadas por la irradiación solar están en La Guajira, Cesar y Córdoba. Esas condiciones de excepción son una oportunidad para modelos comunitarios y asociativos en La Alta y Media Guajira y La Serranía del Perijá.

El informe más reciente de la UPME, correspondiente al 2024 (Informe de Registro de Proyectos de Generación), revela que la generación de energía por medio de la tecnología solar está en proceso de expansión y crecimiento importante por su capacidad de instalación y fácil movilidad, especialmente porque Colombia tiene una alta capacidad de irradiación solar.

Los departamentos como Bolívar, Córdoba, Cesar, Sucre, Tolima entre otros tienen una mayor participación en la proyección de creación de granjas solares, lo que permite que para el año 2032, se tenga una parcelación importante en generación energética de estos territorios. Aquellos territorios que tiene mayor capacidad de la radiación solar tienen más oportunidad de generar electricidad alternativa, tema que es importante en materia económica, y social, pero que puede levantar algunas alertas en materia ambiental, pues no es desconocido que para la implementación de estas granjas es necesaria la utilización del suelo, y su cambio de uso o destinación y es fundamental encontrar un equilibrio entre los nuevos desarrollos en materia de energías renovables con los impactos sociales y ambientales que garanticen un desarrollo energético sostenible.

En la Figura 9 se presentan los 212 proyectos de generación solar vigentes distribuidos en los departamentos de Colombia, donde se evidencia que los departamentos costeros y aquellos territorios aledaños a fuentes hídricas como ríos, son los de mayor potencial en la generación de proyectos energéticos fotovoltaica. Estos proyectos pretenden la generación de 11218 MW.

Figura 9
Capacidad de proyectos solares vigentes (MW)



Nota. Fuente: https://www1.upme.gov.co/siel/Inscripcion_proyectos_generacion/Registro_febrero_2024.pdf

Por lo anterior, es importante evaluar qué cantidad de área se requiere y donde los organismos estatales y la gobernanza llevan este indicador, la afectación a la calidad y cantidad del suelo, que hoy es y puede utilizarse en materia ambiental, en seguridad alimentaria, protección de fauna y flora, protección a resguardos y sitios culturales. Como por ejemplo, CELSIA en sus dos proyectos de 18,6 MW (2018), emplea 30 hectáreas de suelo, equivalentes aproximadamente a 37 estadios de fútbol y si se realiza una comparación con el artículo escrito por Alejandra Zapata para el periódico El colombiano (2024) donde se indica que se espera que en Colombia entren en operación 65 proyectos de energía solar renovable y 1 de almacenamiento de energía, adicionando a la matriz energética 3040 MW, se requerían aproximadamente 4903 hectáreas de suelo, el equivalente a 6867 estadios de fútbol, o en otro comparativo Armenia – Quindío tiene una extensión de suelo urbano de 2357 hectáreas, (según el Acuerdo 019 del 2009 POT), lo que estaríamos hablando que se requieren para estos 66 proyectos un aproximado de 2 ciudades como Armenia en su cobertura urbana para estar cerca de atender una población con el servicio de energía eléctrica como la de Bogotá.

7 Resultados y Discusión

Para contestar la pregunta ¿La implementación de la tecnología de energía fotovoltaica en Colombia conduce al desarrollo energético sostenible? Se desarrolló una serie de investigaciones y rastreo de información que permitió primero evaluar las condiciones internacionales de la implementación de la energía fotovoltaica, la forma como se han elaborado y desarrollado la conformación de Indicadores, que permiten a las organizaciones internacionales y a los gobiernos el poder tomar decisiones claras en la materia. Lo que permite evaluar sus beneficios y afectaciones, evidenciamos se perciben indicadores que ayudan a generar una visual en Colombia, para establecer que datos son necesarios para evaluar la viabilidad o no de estas tecnologías.

Los principales indicadores empleados para la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas energéticos se encuentran los IEDS, ODS7, CEPAL; estos últimos en el contexto de la región de Latino América y el Caribe, en la siguiente Tabla 20 se realiza el resumen de los indicadores o grupo de indicadores identificados en los artículos o documentos seleccionados en la revisión literaria de este trabajo. Es importante tener en cuenta las recomendaciones de OIEA (2008) y Gunnarsdottir et al. (2022) los indicadores deben interpretarse en el contexto nacional teniendo en cuenta los objetivos establecidos, los recursos energéticos, la economía del país, los impactos en cada una de las dimensiones teniendo en cuenta la participación activa de las partes interesadas para realizar una medición confiable que permita a los tomadores de decisiones tener herramientas para conocer la actualidad y como están evolucionando las políticas o acciones sobre el SED.

De la revisión literaria también se identifica que muchos de los artículos para los sistemas fotovoltaicos toman la herramienta de análisis de ciclo de vida (ACV), y para el análisis general de los indicadores emplean las metodologías para poderlos evaluar de una forma transparente o seleccionar para analizar la SED de un país o un tema determinado relacionado entre ellos se encontró la metodología de AHP, con variaciones, técnicas de encuestas y en el ámbito regional la metodología de la CEPAL. En el sentido del análisis donde los conjuntos de indicadores tienen un énfasis importante en la dimensión económica y un reconocimiento menor o nulo en los impactos sociales o ambientales (Gunnarsdottir, Davidsdottir, Worrell, & Sigurgersdottir, 2020), al revisar los indicadores propuestos por la UPME (Tabla 18) para observar el sector energético en Colombia también se muestra este patrón identificado por varios autores a nivel internacional.

Tabla 20

Resumen de los grupos de indicadores identificados para el SED

| Ítem | Título | Autores | Año | Indicadores | Dimensiones |
|------|---|--|------|---|----------------------------------|
| 1 | Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials | Harish Trivedi, Arunabh Meshram, Rajeev Gupta | 2023 | Tiempo de recuperación de la energía (EPBT) Tasa de retorno interno (TIR) Retorno de la inversión (ROI) | Técnico Económico |
| 5 | A comprehensive review on wind energy in Africa: Challenges, benefits and recommendations. | Solomon Boadu, Ebenezer Otoo, | 2023 | Coste nivelado medio ponderado de la energía (LCOE) | Técnico Económico |
| 9 | Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías | Organismo Internacional de Energía Atómica | 2008 | Indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS) planteados por la IAEA o OIEA | Social Económico Ambiental |
| 11 | Política Mexicana e indicadores de sustentabilidad | Claudica Sheinbaum Pardo, Víctor Rodríguez Padillas, Guillermo Robles Morales | 2009 | Indicadores planteados por CEPAL et al. (2003) | Social Económico Ambiental |
| 12 | Indicadores de Desarrollo Energético Sustentable. Caso: Quintana Roo, México | Hernández-Rodríguez, José; Acosta-Olea, Roberto; Barbosa-Pool, Gliserio Romeli; Aguilar-Aguilar, Jorge Ovidio; Chargoy-Rosas, Mónica Ariadna; Quinto-Diez, Pedro | 2016 | Indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS) planteados por la IAEA o OIEA Indicadores planteados para ODS7 | Social Económico Ambiental |
| 13 | Análisis e interpretación de indicadores energéticos para el desarrollo sostenible de Guatemala | Sergio Manuel Melendez Mendizabal | 2014 | Indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS) planteados por la IAEA o OIEA Indicadores para el índice de sostenibilidad energética (ISE) | Social Económico Ambiental |

| Ítem | Título | Autores | Año | Indicadores | Dimensiones |
|------|--|---|------|--|-----------------------------------|
| 19 | Environmental, energy security, and energy equity (3E) benefits of net-zero emission strategy in a developing country: A case study of Nepal | Shree Raj Shakya, Hombre Amrit Nakarmi, Anita Prajapati, Bijay Bahadur Pradhan, Utsav Shree Rajbhandari, Maheswar Rupakheti, Mark G. Lawrence | 2023 | Indicadores de medidas de cobeneficios Indicadores de seguridad energética Indicadores de equidad energética Zonificación del territorio por población demográfica índice de importación neta de energía (NEIR) Proporción de energía renovable (SRE) índice Shannon-Weiner (SWI) Relación entre el costo del combustible importado PIB (FGDP) Intensidad energética del PIB (EGDP) Consumo de electricidad per cápita | Social Económico |
| 25 | Energía y desarrollo sustentable en America Latina y el Caribe | German Agency for Technical Cooperation-NU. CEPAL-OLADE | 2003 | Indicadores planteados por CEPAL et al. (2003) | Social Económico Ambiental |
| 33 | Environmental and economic performance assessment of integrated conventional solar photovoltaic and agrophotovoltaic systems | MM Junedi, NA Ludin, NH Hamid, PR Kathleen, J. Hasila, NA Ahmad Affandi | 2022 | Tiempo de recuperación de la energía (EPBT) Coste nivelado de la energía (LCOE) Gases de efecto invernadero (GEI) | Técnico Económico Ambiental |
| 34 | A combined assessment of the energy, economic and environmental performance of a photovoltaic system in the Italian context | Annarita Paiano, Giovanni Lagioia, Carlo Ingraio | 2023 | Tiempo de recuperación de la energía (EPBT) Retorno de la Inversión Energética (EROI) Potencial de mitigación del impacto ambiental (EIMP) Coste nivelado de la energía (LCOE) Valor presente neto (VAN) Periodo de recuperación (PBP) | Técnico Económico Ambiental |

| Ítem | Título | Autores | Año | Indicadores | Dimensiones |
|------|---|---|------|---|----------------------------------|
| 35 | Objectives, Keys and Results in the Water Networks to Reach the Sustainable Development Goals. | Ángel Valentín Mercedes García, Petra Amparo López-Jiménez , Francisco-Javier Sánchez-Romero y Modesto Pérez-Sánchez. | 2021 | Indicadores planteados para ODS7, ODS11 y ODS12 Calidad de servicio Gases de efecto invernadero (GEI) Costo unitario total Eficiencia en la planificación y ejecución de inversiones Eficiencia operativa Eficiencia en la gestión empresarial Sostenibilidad financiera Acceso al servicio Sostenibilidad ambiental | Social Económico Ambiental |
| 42 | Review of indicators for sustainable energy development | I. Gunnarsdottir, B. Davidsdottir, E. Worrell, S. Sigurgeirsdottir | 2020 | Índice del Trilema Energético (ETI) Índice de Desempeño de la Arquitectura Energética Indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS) planteados por la IAEA o OIEA | Social Económico Ambiental |
| 43 | Suitable municipalities for biomass energy use in Colombia based on a multicriteria analysis from a sustainable development perspective | María Jisset Calvo-Saad, Juan Sebastián Solís-Chaves, Walter Murillo-Arango | 2023 | Revisión de Indicadores planteados por CEPAL et al. (2003), los Indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS) planteados por la IAEA o OIEA, entre otros. Los indicadores seleccionados: Potencial energético de la biomasa (BEP) Zonas no interconectadas (Hogares sin acceso a electricidad comercial) (ZIN) Índice de desarrollo humano (IDH) Gases de efecto invernadero (GEI) Parques Nacionales Naturales (PNN) Indicador de importancia económica municipal (MEII) | Social Económico Ambiental |

| Ítem | Título | Autores | Año | Indicadores | Dimensiones |
|------|--|--|------|--|----------------------------------|
| 45 | Indicators for sustainable energy development: An Icelandic case study | I. Gunnarsdottira, B. Davidsdottira, E. Worrell, S. Sigurgeirsdottir | 2022 | <p>Los autores crearon un grupo de indicadores para el contexto de Islandia, basándose en:</p> <p>Índice del Trilema Energético (ETI)</p> <p>Índice de Desempeño de la Arquitectura Energética</p> <p>Indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS) planteados por la IAEA o OIEA</p> <p>Indicadores planteados para ODS7</p> | Social Económico Ambiental |
| 50 | Challenges and perspectives of the use of photovoltaic solar energy in Colombia | Christian Manuel Moreno Rocha, Celene Milanés Batista, William Fernando Arguello Rodríguez, Arley Jesús Fontalvo Ballesteros, José Ricardo Núñez Álvarez | 2022 | <p>% de proyectos de energía solar / proyectos presentados</p> <p>Proyectos actuales de energía solar por departamento</p> <p>Capacidad de energía solar instalada por departamento</p> <p>% Capacidad de energía solar instalada por departamento</p> | Técnico Económico |
| 55 | Indicadores de sostenibilidad de las termoeléctricas en la Amazonía, estudio de caso en Rondônia | Torres do Amaral, C; de Souza, A; Carvalho | 2019 | <p>Los autores presentan una metodología de análisis de sostenibilidad de plantas térmicas para el sistema aislado en la Amazonía. El documento describe los indicadores para la construcción de un indicador general de sostenibilidad.</p> | Social Económico Ambiental |

| Ítem | Título | Autores | Año | Indicadores | Dimensiones |
|------|---|---|------|---|----------------------------------|
| 67 | Guía metodológica diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible | Schuschny, A; Soto,H - CEPAL | 2009 | Resumen de las propuestas de Indicadores de Desarrollo Sostenible para la fecha Indicadores de la Comisión de Desarrollo Sostenible - CDS Indicadores de los Objetivos de Desarrollo del Milenio - ODM Estadísticas de Base de Datos de Estadísticas e Indicadores Ambientales BADEIMA - CEPAL Indicadores del proyecto Evaluación de la Sostenibilidad en América Latina y el Caribe - ESALC Indicadores de la Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el Desarrollo Sostenible - ILAC | Social Económico Ambiental |
| 76 | Solar plants, environmental degradation and local socioeconomic contexts: A case study in a Mediterranean country | Lavinia Delfanti, Andrea Colantoni, Fabio Recanatesi, Massimiliano Bencardino, Adele Sateriano, Ilaria Zambon, Luca Salvati | 2016 | Indicadores contextuales: 1. altitud media (m) 2. densidad de población para 2007 (habitantes/km2), 3. variación porcentual de la densidad poblacional entre 2007 y 2014 4. superficie total administrada por cada municipio (km2) Indicador de la superficie destinada a campos fotovoltaicos montados en el suelo en Italia por año | Técnico |
| 77 | Energy sustainability from analysis of sustainable development indicators: A case study in Taiwan | Wen/Tien Tsai | 2010 | Indicadores de desarrollo sostenible de Taiwán (TSDI) Indicadores energéticos del desarrollo sostenible (IEDS) planteados por la IAEA o OIEA | Social Económico Ambiental |

Nota. Elaboración propia

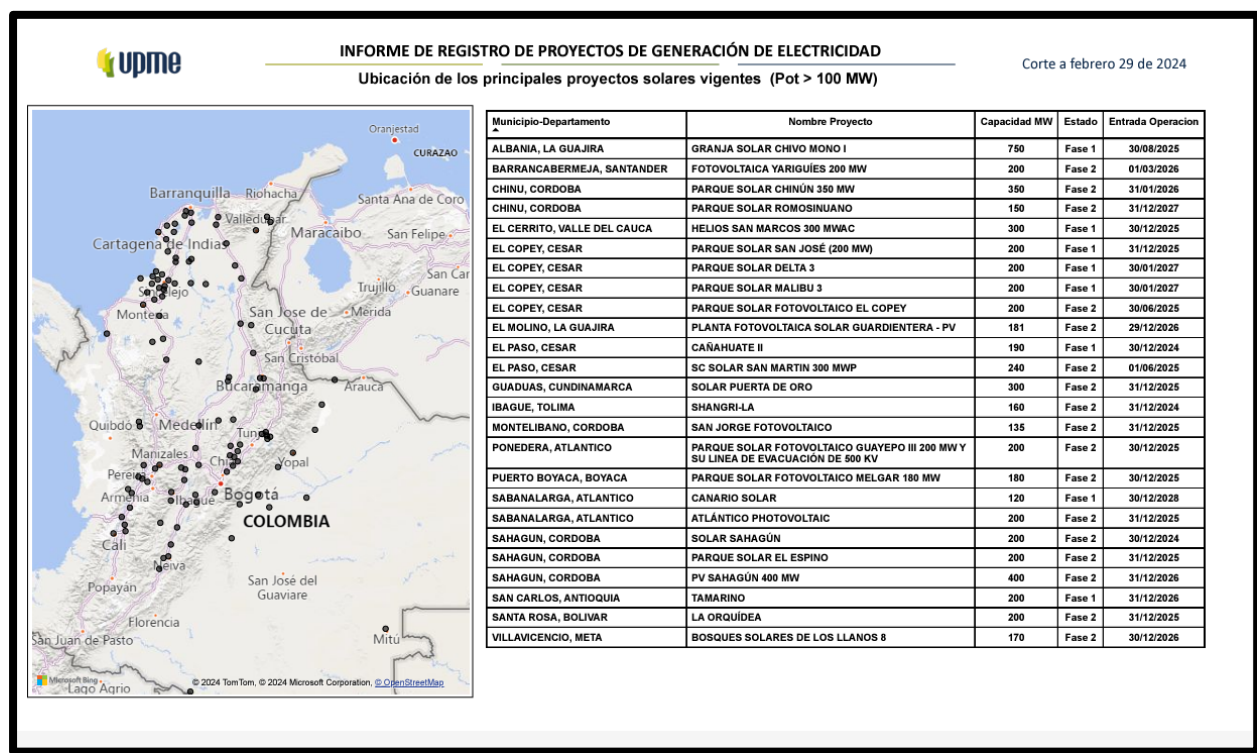
Las diferentes investigaciones realizada a lo largo y ancho del planeta en materia sostenibilidad en el sector energético permiten encontrar que las tres dimensiones descritas desde el 2008 (Ambiental, Social y Económico), son la base del desarrollo de casi todas las metodologías, en igual número de importancia, y cada una de ellas debe tener una subdivisiones por sectores y necesidades lo cual establece una ruta segura para la recopilación de datos tanto cuantificables como calificables que ayudan a la implementación de indicadores acordes a la región donde se está desarrollando la medición. Es importante para realizar estas evaluaciones contar con fuentes de información confiable y una de las recomendaciones dadas, especialmente, en los documentos de la región latinoamericana, como en el caso de Quintana Roo, México (2016) donde los autores indican que para realizar una evaluación y análisis de los indicadores se debe contar con una buena fuente de información confiable que permita obtener valores y así mismo, poder ampliar los indicadores a evaluar para poder analizar el progreso de los indicadores del SED.

Como propuesta de esas fuentes de información para Colombia se cuentan con organismos como la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), MINCIENCIAS, Ministerio de Minas y Energía, el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas (IPSE), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el Departamento Nacional de Planeación (DPN), Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN), Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (Acolgen), Ministerio de agricultura, repositorios de las diferentes universidades nacionales, los grupos o instituciones de investigación como el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), bases de datos; a nivel regional las publicaciones estadísticas de la CEPAL (CEPALSTAT), base de información de eficiencia energética desarrollado por CEPAL(BIEE), Observatorio Regional de Energías Sostenibles (ROSE), la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la Comisión de Integración Energética Regional (CIER), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID); y a nivel mundial la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA), las Naciones Unidas, entre otras instituciones.

Colombia bajo su política de transición energética ha realizado grandes avances hacia la diversificación de su matriz energética, especialmente en proyectos de energía solar que son cerca del 70,2% que se encuentran en las fases 1, 2 y 3 (ver Figura 10) aunque esta transición se enfrenta a grandes desafíos respecto a la ubicación, el uso de la tierra, el impacto hacia las comunidades, el

impacto en la economía del país, los impactos ambientales y sociales como indica el reportaje del El colombiano (Santos, 2023) y el libro publicado por la Universidad Externado de Colombia (González Espinosa, Patzy, & Peña Niño, 2023) estas son temáticas que se están viviendo actualmente en el desarrollo de los proyectos de energías renovables y se deben tener presentes en la construcción de un sistema energético sostenible.

Figura 10
Ubicación de los principales proyectos solares vigentes



Nota. Fuente: https://www1.upme.gov.co/siel/Inscripcion_proyectos_generacion/Registro_febrero_2024.pdf

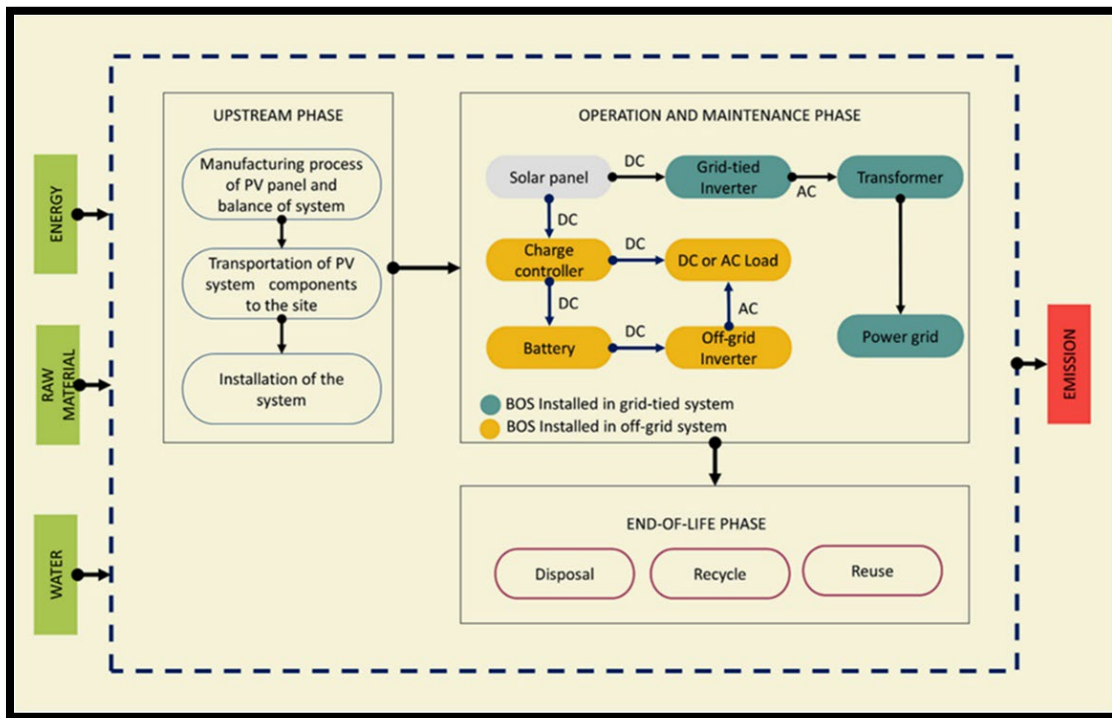
Los ejes que construyen sostenibilidad son la integración ambiental, social y gobernanza los principios ESG. Colombia tiene una gran oportunidad de avanzar sobre lo construido por otros países como son en el caso de España, Islandia, Italia, Francia, Estados Unidos, China, entre otros; en materia de implementar las mejores prácticas para la construcción de plantas solares durante las dos últimas décadas; por ejemplo, la guía desarrollada por la Unión Española Fotovoltaica UNEF (Guía de mejores practicas para el desarrollo de plantas solares, 2022).

Tomando como base el Ciclo de Vida de una planta solar, Figura 11, el cual permite evaluar y proponer un listado de indicadores relevantes de las dimensiones de la sostenibilidad para el

contexto colombiano y los sistemas fotovoltaicos estudiados en la revisión bibliografía realizada se desarrolla un análisis para proponer un listado de indicadores de sostenibilidad en torno a la generación de energía con sistemas fotovoltaicos en Colombia.

Figura 11

Fases del ciclo de vida de una planta solar conectada a la red y fuera de la red



Nota. Fuente: (Environmental and economic performance assessment of integrated conventional solar photovoltaic and agrophotovoltaic systems, 2022)

En el ciclo de vida, la fase aguas arriba de la operación y mantenimiento de un parque solar se tienen como entrada la energía, el transporte, el agua, químicos y las materias primas necesarias para poder fabricar los paneles solares y todos los componentes del equilibrio del sistema (BOS) que son la estructura, cables, inversor, transformador, entre otros elementos asociados a un GM-PV. En esta etapa, el Gobierno nacional, las organizaciones y las empresas desarrolladoras de estos proyectos deben evaluar la procedencia de las materias primas, entre ellos los minerales necesarios para la fabricación de los elementos que componen la tecnología. Este tema es importante en el proceso de garantizar que esta implementación energética en Colombia no favorezca a aquellas naciones que por sus situaciones de conflicto generan grandes problemas a la humanidad con la

explotación indebida de los derechos humanos, destrucción indiscriminada de ecosistemas, buscando beneficios económicos y medir las afectaciones caso particular como lo estableció el gobierno Inglés y Norteamericano, cuando catalogaron estos materiales como “minerales en conflicto”, los cuales están señalados y se genera permanente vigilancia de las organizaciones internacionales para que estos no abastezca la industria de la energía renovable la cual busca un desarrollo sostenible.

Teniendo presente el principio “intensiva en conocimiento” de la hoja de ruta de la Transición Energética Justa (Ministerio de Minas y Energía, 2023) donde se pretende fomentar el desarrollo industrial nacional asociado a las energías renovables y el mejoramiento de la eficiencia energética, es una oportunidad para incentivar la industria manufacturera de los componentes de los sistemas solares en el país para impulsar la economía y el empleo, sin depender de países como China; ya que con la reducción en la producción del petróleo y el carbón en el país se podrían perder 362000 empleos, el PIB puede retroceder un 3,5% si la transición no se hace de manera gradual, la pobreza moderada podría aumentar 3,26% y la pobreza extrema 1,4% según el análisis realizado por el Departamento Nacional de Planeación en conjunto con la Agencia Francesa de Desarrollo y la CEPAL. (La República, 2023)

En la etapa de planeación, diseño y construcción de los parques solares de acuerdo con los principios de equidad, participación social vinculante, la gradualidad, soberanía y confiabilidad y la transición energética intensiva en conocimiento donde sus principales objetivos eliminar las brechas energéticas, respetar los ecosistemas, generar el menor impacto en la sociedad y el ambiente, y la confiabilidad del servicio de energía eléctrica. Los desarrolladores y las organizaciones reguladoras de los proyectos de parques solares deben fomentar la selección de una ubicación evitando áreas sensibles desde el punto de vista ambiental y de las comunidades, fomentar los estudios y las aplicaciones de la integración de la producción de energía con el sector primario como los proyectos agrovoltaicos en tierras de cultivo, ganadería o apicultura. Adicionalmente, minimizar el impacto durante la construcción, tener planes de restauración ambiental, programas de formación profesional, programas de generación de empleo directo e indirecto, planes de utilidades de bienes y servicios locales, priorizar la participación de las partes interesadas, tener relaciones transparentes y diálogos con la comunidad, los entes territoriales y los grupos sociales de las regiones donde se ubicarán los desarrollos de los sistemas solares.

Por otra parte, realizar todos los estudios de viabilidad del proyecto donde son importantes los indicadores técnicos y económicos como VAN, EPBT, TIR, ROI, LCOE, CO₂eq/kWh, PBP, irradiación solar, vida útil, producción de electricidad, entre otros; permitirán asegurar la diversificación de la matriz energética, la confiabilidad del sistema, asegurar la demanda del servicio de energía eléctrica, y garantizar precios justos del servicio y evitar futuras reclamaciones y/o demandas de los desarrolladores de estos proyectos a la nación generando costos a la población civil y/o detrimentos fiscales y patrimoniales al país.

En la fase de operación y mantenimiento es importante mantener el dialogo con las comunidades, generar empleo directo e indirecto, continuar con los planes de formación, de uso de bienes y servicios, de la integración de los demás sectores productivos con la generación de energía, fomentar programas de eficiencia energética, el uso de vehículos híbridos y eléctricos, programas sobre el uso racional de la energía, disminuir los impactos en el suelo, en la biodiversidad, en el agua, en el aire con las tecnologías empleadas para el mantenimiento de los paneles y demás elementos asociados a las granjas solares.

En la fase final o EoL, existe una gran oportunidad para aplicar el principio de la transición energética intensiva en conocimiento, según encontrado en la literatura es un tema nuevo donde Colombia tiene una oportunidad de generar conocimiento e industria y poder realizar una economía circular con la recuperación de materias primas para fabricar nuevamente los elementos de un sistema fotovoltaico o venderlas en el mercado y disminuir los riesgos asociados a la sostenibilidad con la minería como los DDHH y el recurso limitado. De igual modo, desde la concepción del proyecto se deben tener planes y programas para el mantenimiento y desmantelamiento de los componentes de los sistemas solares, el reciclaje y el restablecimiento del terreno después de cumplir su vida útil.

Las entidades gubernamentales deben propiciar las políticas, normas, planes, hojas de ruta para evitar que en 20 o 30 años se tengan toneladas de residuos de instalaciones solares y no tener un horizonte de reciclado, reutilización y disposición final de estos materiales generando un impacto ambiental mayor al que tenemos actualmente por la generación de energía eléctrica proveniente de los combustibles fósiles. De acuerdo, con Juan Coble (¿Qué pasará con las plantas solares cuando termine su vida útil?, 2021) en Europa actualmente hay aproximadamente 35.000 toneladas de residuos de instalaciones solares e impulsar el reciclaje de los paneles solares “mejoraría enormemente la huella de carbono de la industria fotovoltaica y se completaría el ciclo

de vida de los paneles fotovoltaicos integrando de nuevo sus componentes en el ciclo productivo del sector fotovoltaico (y de otros sectores). Se introducirían así prácticas de economía circular en una tecnología de producción de energía que reúne ya todos los componentes para ser una de las más limpias y silenciosas del planeta”.

A continuación, se realiza una propuesta en la selección de indicadores considerando el alcance de este trabajo sobre la tecnología de generación de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos en Colombia, teniendo en cuenta la revisión literaria.

Tabla 21
Indicadores económicos propuestos

| Dimensión | Tema | Indicador | Referencia |
|-----------------------|---|--|----------------------|
| Técnicos | | Tiempo de recuperación de la energía (EPBT) | [1], [33], [34], |
| | | Tasa de retorno interno (TIR) | [1] |
| | | Retorno de la inversión (ROI) | [1] |
| | | Coste nivelado medio ponderado de la energía (LCOE) | [2], [33], [34], |
| | | Periodo de recuperación (PBP) | [34], |
| | | Valor presente neto (VAN) | [34] |
| | | Capacidad solar instalada de generación de energía eléctrica | Propio |
| | Productividad | Uso de energía solar por unidad de PIB | UPME, [11], IEDS [9] |
| | Uso final | Uso de energía solar por hogar | UPME, IEDS [9] |
| | | Consumo de energía para el transporte | [45] |
| Acceso | Proporción de la energía renovable en el consumo final total de energía | ODS 7 - CEPAL | |
| Económica | Precios | Costos de generación | [16] |
| | Precios | Precio de la energía | IEDS [9] |
| | Gastos / ingresos del gobierno | Inversiones gubernamentales en desarrollo de infraestructura | [45] |
| | | Gasto gubernamental en subsidios | [45] |
| | | Ingresos del gobierno por ventas de energía | [45] |
| | Patrones de producción y uso | Eficiencia en el suministro | IEDS [9] |
| | Empleos formales | Puestos de trabajo en el municipio donde existe la infraestructura solar | [55] |
| | Ingreso per cápita | Ingreso per cápita en el municipio atendido por la infraestructura solar | [55] |
| Conexiones eléctricas | Conexiones eléctricas en residencias | [55] | |

Nota. Fuente: elaboración propia

Se realiza propuesta de indicadores sociales separados para el SIN y las ZNI, para esta última se ha tenido como base el estudio del estado de Rondônia (2021) sobre la generación de energía en zonas aisladas con diésel. En Colombia la capacidad instalada de energía eléctrica

mediante plantas de generación diésel en las ZNI es del 84,3% (ver Tabla 17), teniendo en cuenta que el 66% del territorio Nacional comprende estas zonas y existen varios proyectos de generación solar e híbrida para aumentar el acceso a la energía de las comunidades, pasando de 4 a 24 horas de servicio de energía al día. (Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, 2023), se hace importante realizar esta distinción.

Tabla 22
Indicadores sociales propuestos para ZNI

| Dimensión | Tema | Indicador | Referencia | |
|---------------------------------|------------------------|---|---|----------|
| Social | Equidad | Unidades de servicios públicos del municipio por número de conexiones | [55] | |
| | | Unidades de educación en el municipio por número de conexiones | [55] | |
| | | Estudiantes en la escuela en el municipio por número de conexiones. | [55] | |
| | | Población indígena del municipio por número de conexiones | [55] | |
| | | Porcentaje de hogares del municipio electrificados por conexiones | CEPAL | |
| | Calidad del suministro | del | Frecuencia de la red eléctrica | [45] |
| | | | Frecuencia y duración de los apagones | [45] |
| | | | Porcentaje de mortalidad infantil con relación a los nacidos vivos en el municipio por número de conexiones | [55] |
| | Salud | | Accidentes fatales relacionados con la cadena energética | IEDS [9] |
| | | | Participación pública en la formulación de políticas relacionadas con la energía | [45] |
| Aceptación pública y beneficios | | Número de personas capacitadas en la generación de energía con tecnología solar | propio | |

Nota. Fuente: elaboración propia

Tabla 23
Indicadores sociales propuestos para SIN

| Dimensión | Tema | Indicador | Referencia | |
|------------------|---------------------------------|--|--|--------|
| Social | Equidad | Proporción de la población con acceso a la electricidad | [12], ODS 7- CEPAL | |
| | | Porcentaje de hogares sin acceso a energía eléctrica | UPME | |
| | | Uso de energía doméstica para cada grupo de hogares | UPME, IEDS [9] | |
| | Salud | Accidentes fatales relacionados con la cadena energética | IEDS [9] | |
| | Calidad del suministro | Frecuencia de la red eléctrica | [45] | |
| | | Frecuencia y duración de los apagones | [45] | |
| | Aceptación pública y beneficios | Participación pública en la formulación de políticas relacionadas con la energía | | [45] |
| | | | Inversión en acciones socioambientales | [55] |
| | | Número de personas capacitadas en la generación de energía con tecnología solar | | propio |
| | | | Índice de desarrollo humano (IDH) | [43] |

Nota. Fuente: elaboración propia

Para la dimensión ambiental, se plantean los mismos indicadores para el SIN y la ZNI. Se incluye un grupo de indicadores asociados con la disposición de residuos cuando finalice la vida útil de paneles y baterías, aspecto importante en los sistemas fotovoltaicos, al igual que indicadores asociados con el uso de la tierra. En la Tabla 24 se presentan estos indicadores.

Tabla 24
Indicadores ambientales propuestos

| Dimensión | Tema | Indicador | Referencia |
|------------------|--------------------------|--|-------------------|
| Ambiental | Atmósfera | Potencial de mitigación del impacto ambiental (EIMP) CO ₂ eq/kWh | [12] |
| | | Emisiones de GEI, per cápita y por PIB | IEDS [9] UPME |
| | | Concentraciones ambientales de contaminantes del aire en zonas urbanas. | [45] |
| | Agua | Descarga de contaminantes en efluentes líquidos procedentes de los sistemas energéticos | IEDS [9] |
| | | Tasa de extracción y consumo de agua | [73] |
| | Tierra | Área total de impacto de las centrales eléctricas | [45] |
| | | Tasa de deforestación atribuida al uso de energía | IEDS [9] |
| | Residuos | Relación entre desechos sólidos adecuadamente evacuados y el total de desechos sólidos generados | IEDS [9] |
| | | Tasa de generación de residuos sólidos por energía producida | IEDS [9] |
| | Hábitat de flora y fauna | Perdida de niveles de biodiversidad | PNN, [75] |
| | | Cambio en el % de representatividad de la riqueza de especies terrestres | PNN, [75] |

Nota. Fuente: elaboración propia

8 Conclusiones

Durante el recorrido de las indagaciones y lecturas del material compilado, encontramos información que nos permitió entender las diferentes formas y metodologías que los órganos institucionales y de gobernanza han desarrollado para contener y/o esquematizar la información sobre sostenibilidad en el sector energético, teniendo presente que la tendencia global se enfoca en una transición a la generación de energía sostenibles.

En los países de América Latina y el Caribe, existe un fortalecimiento de las políticas en materia de transición energética, tema que se ha planteado por la ONU como uno de los mismo Objetivos de Sostenibilidad ODS7. Los países latinoamericanos han venido generando políticas y normatividad que ajuste los mercados al ingreso de estas nuevas tecnologías, y han fortalecido los ya existentes en materia de hidroeléctricas como es el caso de Colombia, a través de Ley 1715 de 2014, posterior Resolución de la CREG 201 del 2017; de igual forma el Decreto Nacional 570 de 2018, normatividad que, entre otra ya establecida en este documento, ha permitido dar la ruta para que Colombia inicie los procesos de fortalecimiento de malla eléctrica con metodologías sostenibles, como es la generación de energía fotovoltaica. En este proceso en el gobierno de Iván Duque, se invita a través de una política de fortalecimiento energético a los sectores privados a invertir en la construcción de plantas o granjas generadores de energía soportado el sol (fotovoltaica). En este proceso evidenciamos que se desarrolló como política pública mediante el Ministerio de Minas y Energía que definió las zonas con mayor influencia de radiación solar en el país, para proyectar la implementación y asentamiento de las futuras granjas solares.

Colombia en el proceso de transformación ha evaluado su capacidad de requerir energía eléctrica y las distintas fuentes de generación, en este entendido el gobierno nacional ha proyectado la demanda promedio mensual del MR estuvo en los 4460 GWh/mes para el periodo 2023-2024. Se estima que el rango esperado para la demanda de energía eléctrica en el corto plazo (próximos 2 años) con un intervalo de confianza al 95 %, entre 199 MW a 239 GWh-día, hablaríamos de 199000 MW/h a 239000 MW/h. (Ministerio de Minas y Energía - UPME, 2024) .Tema que permite evidenciar que la malla energética del país debe crecer, y esta debe estar enfocada en nuevas tecnologías que permitan generar más cobertura en zonas del país donde es y ha sido difícil la cobertura pues el crecimiento demográfico en los últimos años ha venido generando grandes densificaciones de áreas que requieren de una mejor calidad de vida y mayor oportunidad, por lo

que se necesita del acceso a la electricidad o energía, pero esta mayor cobertura no puede ser soportado en más ampliación de la dependencia de la generación de energía sobre combustible fósiles.

Al realizar el rastreo de información, se evidencia la existencia de muchas herramientas en materia de generación de indicadores que pueden permitir evaluar las posibilidades que se tiene en Colombia para la implementación exitosa de la transformación energética solar para cubrir el mercado que hoy se tiene con la generadores de energía soportada en combustibles fósiles y considerando las implicaciones en todos los ámbitos de la sostenibilidad que puede tener la implementación de los sistemas fotovoltaicos.

La generación de un sistema de indicadores que permita evaluar los diferentes frentes de información permitirá no dejar elementos cruciales fuera de la información requerida para que el proceso sea absolutamente rentable, sostenible y amigable. En la generación de esta información debe contemplarse la consolidación de información que evalúe cuales estrategias se deben tomar en materia de disposición final de los residuos generados cuando termine la vida útil cada dispositivo, sea del panel o de las baterías de almacenamiento energético; este tema es demasiado trascendente pues al analizar los componentes necesarios para fabricar cada panel fotovoltaico y sus dispositivos de almacenamiento.

En este mismo contexto, tampoco se evidencia una información clara sobre la cantidad de área de suelo, requerida para las granjas que generen la capacidad instalada de producción de energía sostenible que permita el remplazo de las generadoras termoeléctricas que representan actualmente una generación de 5700 MW, de la capacidad instalada de Colombia, equivalente a un 28% del total del país. Por lo tanto, un sistema de indicadores de sostenibilidad en sistemas fotovoltaicos debe incluir indicadores asociados con el uso de la tierra.

Los sistemas de indicadores que den cuenta del impacto de la implementación de sistemas de generación de energía deben ser conocidos no solo por el Estado y las empresas generadoras, sino que debe ser compartidos con las comunidades para tomar decisiones más acertadas para el desarrollo sostenible de un país.

9 Recomendaciones

Como recomendaciones es importante tener presente las conclusiones, donde se evidencia de forma clara la necesidad de generación de una matriz de indicadores que midan de manera eficiente y asertiva, consolidación de información en materia de los tres enfoques el social, económico y ambiental.

En este proceso es determinante establecer factores importantes que permitan una serie de escenarios en el proceso de desarrollo energético sostenible en Colombia, y en especial el sector de la energía solar, por ello, la matriz a desarrollar debe estar determinada por la conformación de diferentes metodologías teniendo en cuenta la participación de los diferentes grupos de interesados, la ubicación geográfica de la región y si el proyecto es para la SIN o ZNI para producir indicadores específicos del contexto y puedan reflejar los objetivos y desafíos de la sostenibilidad del sistema energético colombiano.

Para tener información para los indicadores es necesaria medir la capacidad de recursos necesarios a explotar por parte de la nación, las áreas de suelo que son requeridas y se debe determinar con precisión las zonas georreferenciadas de tal manera que los entes territoriales puedan de manera precisa si se afecta o se genera el cambio de uso de suelo, sin impactar de forma negativa en zonas de alto valor agrícola o de protección ambiental. La implementación de políticas de energía solar para el incentivar la investigación y el fortalecimiento de la industria para la fabricación de los componentes y del reciclaje de los mismos siguiendo el ejemplo de la Unión Europea con esto contribuir a la economía y potenciar los beneficios sociales y ambientales de la energía solar en el país, así, tener una transición energética donde los recursos fiscales de la nación no se vean comprometidos en un futuro por no tener un marco normativo para este mercado en desarrollo y tener un sistema energético dependiente de otros países y menos recursos fiscales o afectaciones al PIB o aumentando la tasa de desempleo por la disminución de la industria de las energías de combustibles fósiles.

También se recomienda generar y mantener actualizados las bases de datos por parte de los entes estatales para realizar consultas y poder definir, evaluar y analizar los indicadores para el SED colombiano por parte de las entidades estatales para tener fuentes de información confiables y actuales.

Con la política de transición energética colombiana y el principio de la gradualidad, la soberanía y la confiabilidad del sistema energético del país se debe trabajar en realizar estudios, hacer una planeación de estrategias y proyectos para garantizar el suministro de energía no solo con las inversiones requeridas para incrementar la capacidad de generación de energía renovable si no también la identificación de los requisitos e inversiones en tecnología para los sistemas de transmisión y distribución en conjunto con las empresas y entes del gobierno para garantizar un servicio de calidad y continuo obteniendo un sistema confiable, flexible y resiliente que brinde seguridad al país en el suministro de energía eléctrica con los planes de tener una matriz energética con una amplia participación de fuentes de energía renovables, con el objetivo de construir un sistema sostenible y eficiente.

La viabilidad de la transición energética del país no puede ser al 100% dependiente de una sola tecnología, es viable en el sentido que se pretenda generar un mix, entre la generación de energía a través de las Hidroeléctricas, las granjas solares y las granjas eólicas, reduciendo de manera gradual y sustancial la generación de energía soportada en combustible fósil. Se debe constituir una serie de indicadores que permita la medición de los tres enfoques (social, ambiental y económico), en los cuales se contemplen políticas claras en materia de residuos o disposición final de los elementos que componen estas tecnologías una vez terminen su ciclo de vida, así mismo generar una estrategia nacional y reglada dándole herramientas a los entes territoriales, en materia de explotación, incentivos a los propietarios y moradores de los terrenos.

Referencias

- ACIEM. (2023). Institucionalidad del sector eléctrico de 30 años se debe mantener y fortalecer. *Especial ENERCOL 2023*, 1-2. Obtenido de www.aciem.org
- American Psychological Association (APA). (2020). *Publication Manual of the American Psychological Association (7a ed.)*. American Psychological Association.
- BBVA. (2021). *Noruega, el país donde la sostenibilidad no es un sueño*. Obtenido de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/noruega-el-pais-donde-la-sostenibilidad-no-es-un-sueno/>
- Bhandari, K., Collier, J., Ellingson, R., & Apul, D. (2015). Energy paybacktime (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133-141.
- Boadu, S., & Otoo, E. (2023). A comprehensive review on wind energy in Africa: Challenges, benefits and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114035>
- Calvo Saad, M. J., Solis Chavez, J. S., & Murillo Arango, W. (2023). Municipios aptos para el uso de energía de biomasa en Colombia a partir de un análisis multicriterio desde una perspectiva de desarrollo sostenible. *Heliyon*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19874>
- CELSIA. (21 de 06 de 2018). *Proyectos de energía solar que debes conocer en Colombia*. Obtenido de Blog: <https://www.celsia.com/en/blog-celsia/proyectos-de-energia-solar-que-debes-conocer-en-colombia/>
- CEPAL. (2018). *CEPAL*. Recuperado el 10 de 03 de 2024, de chrome-extension://efaidnbmnnnhttp://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/1era_reunion_tecnica_ee_rose.pdf
- Chaparro, J. (2019). *Manejo integral de residuos generados por los paneles solares fotovoltaicos en Colombia*. Universidad Militar Nueva Granada. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/32081/ChaparroPerezJhonFreddy%2C2019.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Coble Castro, J. J. (26 de 08 de 2021). ¿Qué pasará con las plantas solares cuando termine su vida útil? pág. The Conversation. Obtenido de <https://theconversation.com/que-pasara-con-las-plantas-solares-cuando-termine-su-vida-util-165708>

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (19 de 04 de 2023). *www.cepal.org*. Obtenido de https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/ppt_biee-rose_cepal_2023.pdf
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) & Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ). (2009). *Guía metodológica - Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible*. Santiago de Chile: Naciones Unidas. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a627f68b-9902-4fa2-a516-912a903ecf22/content>
- Delfanti, L., Colantoni, A., Recanatesi, F., Bencardino, M., Sateriano, A., Zambon, I., & Salvati, L. (2016). Solar plants, environmental degradation and local socioeconomic contexts: A case study in a Mediterranean country. *Environmental Impact Assessment Review*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.07.003>
- Divya, A., Adish, T., Kaustubh, P., & Zade, P. (2022). Review on recycling of solar modules/panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112151>
- Eliseo Sebastián energía solar. (2022). *Partes de panel solar fotovoltaico*. Obtenido de <https://eliseosebastian.com/elementos-estructura-partes-de-panel-solar-fotovoltaico/>
- Enel. (2022). *Parque Solar Guayepo I&II será del tamaño de 2.000 canchas de fútbol*. Obtenido de <https://www.enel.com.co/es/prensa/news/d202207-inicio-construccion-guayepo.html>
- Energía.coop. (s.f.). *Plataforma de Energía Cooperativa*. Obtenido de Sector Energía: <https://www2.energia.coop/colombia/sector-de-energico/>
- Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía. (11 de 09 de 2023). *En el Pacífico colombiano y en el marco de Comunidades Energéticas, se implementará un sistema innovador híbrido Solar-Diésel en ZNI, inaugurado por MinEnergía y FENOGE*. Obtenido de FENOGE: <https://fenoge.gov.co/en-el-pacifico-colombiano-y-en-el-marco-de-comunidades-energeticas-se-implementara-un-sistema-innovador-hibrido-solar-diesel-en-zni-inaugurado-por-minenergia-y-fenoge/>
- García Acosta, M. V. (2018). *Sistema de reciclaje de textiles post-consumo para el desarrollo de productos de economía circular en la ciudad de Bogotá D.C*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- García Castillo , A. (2021). *Análisis del Ciclo de Vida de una instalación fotovoltaica en Jaén*. Jaén, España: Universidad de Jaén. Obtenido de https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/14560/1/TFGCA_Garcia%20Castillo%2C%20Alicia.pdf
- German Agency for Technical Cooperation-NU. CEPAL-OLADE. (2003). *Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe: guía para la formulación de políticas energéticas*. CEPAL. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/27838-energia-desarrollo-sustentable-america-latina-caribe-guia-la-formulacion>
- Gobierno de México. (2018). *Se inaugura la Planta Solar Villanueva en Coahuila*. . Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/articulos/se-inaugura-la-planta-solar-villanueva-en-coahuila>
- González Dumar, A., Arango Aramburo, S., & Correa Posada, C. M. (2023). Quantifying power system flexibility for the energy transition in Colombia. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109614>
- González Espinosa, A. C., Patzy, F., & Peña Niño, J. (2023). Más diversificación que transición: el balance del gobierno Duque en materia de transición energética. En *Seguimiento y análisis de políticas públicas en Colombia 2022* (págs. 35-62). Bogotá: Universidad Externado de Colombia. Obtenido de <https://bdigital.uexternado.edu.co/server/api/core/bitstreams/815ba2bb-a8e6-4c9a-ad9f-df298240773e/content>
- González Posso, C. (23 de 07 de 2023). Panorama Internacional de las energías renovables. *Instituto de estudios para el desarrollo y la paz*. Obtenido de <https://indepaz.org.co/panorama-internacional-de-las-energias-renovables-por-camilo-gonzalez-posso/>
- Grupo de Investigacion Xué Semillero de Investigación Barión. (2020). *Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/ESTADO-DE-LA-COBERTURA-ELECTRICA-Y-LAS-ZONAS-NO-INTERCONECTADAS-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL-3-1.pdf>
- Gubinelli, G. (11 de 10 de 2023). UPME confía que el 2023 cerrará con casi 1 GW renovable operativo y con la asignación de miles de MW nuevos. *Energía Estratégica*. Obtenido de

- <https://www.energiaestrategica.com/upme-confia-que-el-2023-cerrara-con-casi-1-gw-renovable-operativo-y-con-la-asignacion-de-miles-de-mw-nuevos/>
- Gunnarsdottir, I., Davidsdottir, B., Worrell, E., & Sigurgersdottir, S. (2020). *Review of indicators for sustainable energy development*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110294>
- Gunnarsdottir, I., Davidsdottir, B., Worrell, E., & Sigurgeirsdottir, S. (2022). *Indicators for sustainable energy development: An Icelandic case study* (Vol. 164). *Energy Policy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112926>
- Gutiérrez, J. (08 de 07 de 2021). *Comfama*. Obtenido de Facebook: https://www.facebook.com/comfama/videos/301103241763075/?paipv=0&eav=AfZoBIIgQVEUvTjz1_OpJcbs9VMb8TeZXEeyeJhF32YZ6A7UwDM-Og_Ow4soBBpnyM&_rdr
- Guzmán, C. (2017). *Análisis del impacto ambiental de diferentes tipos de paneles solares según los materiales utilizados y los componentes tóxicos generados*. Fundación Universidad América.
- Hastik, R., Basso, S., Geitner, C., Haida, C., Poljanec, A., Portaccio, A., . . . Walzer, C. (2015). *Renewable energies and ecosystem service impacts*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.004>
- Hernández Rodríguez, J., Acosta Olea, R., Barbosa Pool, G. R., Aguilar Aguilar, J. O., Chargoy Rosas, M. A., & Quinto Diez, P. (2016). *Indicadores de Desarrollo Energético Sustentable. Caso: Quintana Roo, México*. Quivera. Universidad Autónoma del Estado de México. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40152906006>
- Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., . . . Allen, M. F. (2013). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>
- Huber, S., & Steininger, K. (2022). Critical sustainability issues in the production of wind and solar electricity generation as well as storage facilities and possible solutions. *Journal of Cleaner Production*, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130720>
- Iberdrola. (2022). *Energía agrovoltaica, cuando la agricultura y las renovables se dan la mano*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/innovacion/energia-agrovoltaica>
- IM2 energía solar. (2014). *¿Cómo es un panel solar?, ¿De qué está compuesto?* Obtenido de <https://www.im2solar.com/03/2014/como-es-un-panel-solar/>

- Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE). (2023). *Caracterización Energética de las ZNI*. Obtenido de Seguimiento a la Infraestructura y Caracterización Energética de las Zonas No Interconectadas: <https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-de-las-zni/>
- Junedi, M. M., Ludin, N. A., Hamid, N. H., Kathleen, P. R., Hasila, J., & Ahmad Affandi, N. A. (2022). Environmental and economic performance assessment of integrated conventional solar photovoltaic and agrophotovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112799>
- KeeUI Solar. (2021). *Plantas solares más grandes de América Latina*. . Obtenido de <https://keeui.com/2021/11/02/plantas-solares-mas-grandes-de-america-latina/>
- La República. (18 de 09 de 2023). Se perderían 362.000 empleos si se reduce a la mitad producción de petróleo y carbón. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/se-perderian-362-000-empleos-si-se-reduce-a-la-mitad-produccion-de-petroleo-y-carbon-3706948#:~:text=El%20efecto%20en%20los%20departamentos,una%20eliminaci%C3%B3n%20de%20145.000%20empleos.>
- Latunussa, C. E., Ardente, F., Blengini, G. A., & Macini, L. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 101-111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>
- Li, J., Shao, J., Yao, X., & Li, J. (2023). Life cycle analysis of the economic costs and environmental benefits of photovoltaic module waste recycling in China. *Resources, Conservation & Recycling*, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107027>
- Medina, D. E. (12 de 2023). Una política energética para Colombia con asequibilidad, seguridad y sostenibilidad. *Revista ACIEM*, págs. 8-9. Obtenido de https://capacitacion.aciem.com.co/Revista/152/Articulos/Revista-ACIEM-152-8-9.pdf?utm_source=newsletter_4428&utm_medium=email&utm_campaign=%c2%a1conoce-los-contenidos-de-la-revista-aciem-edicion-n%c2%b0-152
- Melendez Mendizabal, S. M. (2014). *Análisis e interpretación de indicadores energéticos para el desarrollo sostenible de Guatemala*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Mercedes Garcia, A. V., López Jiménez , P. A., Sánchez Romero, F. J., & Pérez Sánchez. , M. (2021). Objectives, Keys and Results in the Water Networks to Reach the Sustainable Development Goals. *Water* 2021, 1-20. doi:<https://doi.org/10.3390/w13091268>
- Ministerio de Minas y Energía - UPME. (01 de 2024). *Proyección de la demanda de energía eléctrica, potencia máxima y gas natural 2023 - 2037*. Obtenido de UPME: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Proyecciones_de_Demanda_Final_v_31_01_2024.pdf#:~:text=Se%20estima%20que%20el%20rango%20esperado%20para,un%20intervalo%20de%20confianza%20al%2068%%2C%20se
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/documents/5856/TRANSICION_ENERGETICA_COLOMBIA_BID-MINENERGIA-2403.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Diagnóstico base para la TEJ*. Obtenido de Documentos de la Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa: https://www.minenergia.gov.co/documents/10439/2._Diagn%C3%B3stico_base_para_la_TEJ.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Sistematización de los Dialogos Nacionales*. Obtenido de Documentos de la Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa: https://www.minenergia.gov.co/documents/10438/1._Sistematizaci%C3%B3n_de_los_Dialogos_Nacionales.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (13 de Febrero de 2024). <https://www.minenergia.gov.co/>. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/la-transici%C3%B3n-energ%C3%A9tica-avanza-en-colombia-en-cesar-se-inaugur%C3%B3-el-parque-solar-la-loma-con-387-hect%C3%A1reas-de-paneles-solares/>
- Moore, S., Graff, H., Ouellet, C., Leslie, S., & Olweean, D. (2022). Can we have clean energy and grow our crops too? Solar siting on agricultural land in the United States. *Energy Research & Social Science*, 1-16.
- Moore-O’Leary, K., Hernández, R., Johnston, D., Abella, S., Tanner, K., Swanson, A., . . . Lovich, J. (2017). Sustainability of utility-scale solar energy – critical ecological concepts. *Frontiers in Ecology and the Environment*. doi:<https://doi-org.consultaremota.upb.edu.co/10.1002/fee.1517>

- Moreno Rocha, C. M., Milanés Batista, C., Arguello Rodriguez, W., Fontalvo Ballesteros, A. J., & Nuñez Alvarez, J. R. (10 de 2022). Retos y perspectivas del uso de la energía solar fotovoltaica en Colombia. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12(5), 4521-4528. doi:<https://doi.org/10.11591/ijece.v12i5.pp4521-4528>
- Naciones Unidas. (2018). *Indicadores priorizados para el seguimiento de los ODS en América Latina y el Caribe*. Recuperado el 2024, de Los ODS en América Latina y el Caribe: Centro de gestión del conocimiento estadístico: <https://agenda2030lac.org/estadisticas/indicadores-priorizados-seguimiento-ods.html#7>
- Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivo 7—Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos*. (C. ONU, Editor, J. Wu, & T. Wu, Productores) Recuperado el 2024, de <https://www.un.org/es/chronicle/article/objetivo-7-garantizar-el-acceso-una-energia-asequible-fiable-sostenible-y-moderna-para-todos>
- National Geographic. (2021). *La India apuesta por la energía solar, a pequeña y gran escala*. . Obtenido de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2021/11/la-india-apuesta-por-la-energia-solar-a-pequena-y-gran-escala>
- Ogbomo, O., Amalu, E., Ekere, N., & Olagbegi, P. (2017). A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1225-1238. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.109>
- Olivert, M. (2022). *Estudio de viabilidad técnica, económica y ambiental de una instalación fotovoltaica en un centro de asistencia sanitaria en Denia*. València: Universitat Politècnica de València. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/186322/Olivert%20-%20Estudio%20de%20viabilidad%20tecnica%20economica%20y%20ambiental%20de%20una%20instalacion%20fotovoltaica%20en%20....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2008). *Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías*. Viena, Austria: Organismo Internacional de Energía Atómica. Obtenido de <https://www.iaea.org/publications/search?keywords=indicator&Search=Search>
- Paiano, A., Lagioia, G., & Ingraio, C. (2023). A combined assessment of the energy, economic and environmental performance of a photovoltaic system in the Italian context. *Science of the Total Environment*, 1-17. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161329>

- Palmetto Solar. (2022). *The Minerals in Solar Panels and Solar Batteries*. Obtenido de <https://palmetto.com/learning-center/blog/minerals-in-solar-panels-and-solar-batteries>.
- Periódico de Noticias de eficiencia energética y arquitectura [OVACEN]. (01 de 05 de 2018). *Qué haremos con todos los paneles solares cuando terminen su vida útil*. Obtenido de <https://ovacen.com/paneles-solares-vida-util/>
- Phuang, Z. X., Lin, Z., Lei, P. Y., Hanafiah, M. M., & Woon, K. S. (2022). The dilemma in energy transition in Malaysia: A comparative life cycle assessment of large scale solar and biodiesel production from palm oil. *Journal of Cleaner Production*, 1-13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131475>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2022). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. Obtenido de ODS en acción: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Revista Semana. (2022). *Ecopetrol invertirá US\$34 millones para construir granjas solares en sus dos refinerías*. Obtenido de <https://www.semana.com/economia/empresas/articulo/ecopetrol-invertira-us34-millones-para-construir-granjas-solares-en-sus-dos-refinerias/202203/>
- Revista Semana. (2022). *El parque solar más grande de Colombia ya tiene un comprador para su energía*. Obtenido de <https://www.semana.com/economia/capsulas/articulo/el-parque-solar-mas-grande-de-colombia-ya-tiene-un-comprador-para-su-energia/202210/>
- Riondet, L., Rio, M., Perrot-Bernardet, V., & Zwolinski, P. (2023). Assessing energy technologies sustainability: upscaling photovoltaics using absolute LCA. *Procedia CIRP*, 714-719. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.120>
- Salamanca, J. (2013). Celdas fotovoltaicas de alta eficiencia y sistema de paneles solares del cubesat colombia 1. *Redes de Ingeniería*, 41-50. doi:<https://doi.org/10.14483/2248762X.6381>
- Santos, C. (09 de 08 de 2023). Mercado energético en Colombia: Avances, dificultades y tensiones en la transición. *Data Center Dynamics*. Obtenido de <https://www.datacenterdynamics.com/es/features/mercado-energ%C3%A9tico-en-colombia-avances-dificultades-y-tensiones-en-la-transici%C3%B3n/#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20UPME,pp%20con%20respecto%20a%202020>.

- Sawyer, H., Korfanta, N., Kuffman, M., Robb, B., Telander, A. C., & Mattson, T. (2022). Trade-offs between utility-scale solar development and ungulates on western rangelands. *Front Ecol Environ*, 345-351. doi:<https://doi.org/10.1002/fee.2498>
- Science for a changing world [USGS]. (2019). *Critical Mineral Commodities in Renewable Energy*. . Obtenido de <https://www.usgs.gov/media/images/critical-mineral-commodities-renewable-energy#Solar%20Panels>
- Shakya, S. R., Nakarmi, H. A., Prajapati, A., Pradhan, B. B., Rajbhandari, U. S., Rupakheti, M., & Lawrence, M. G. (2023). *Environmental, energy security, and energy equity (3E) benefits of net-zero emission strategy in a developing country: A case study of Nepal*. Energy Reports. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.055>
- Sheinbaum Pardo, C., Rodriguez Padillas, V., & Robles Morales, G. (2009). *Politica Mexicana e indicadores de sustentabilidad*. Problemas del Desarrollo Revista Latinoamericana de Economia.
- Sultana, I., Chen, Y., Huang, S., & Rahman, M. (2022). Recycled value-added circular energy materials for new battery application: Recycling strategies, challenges, and sustainability- a comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108728>
- Torres do Amaral, C., De Souza, A., & Carvalho, J. (2021). *Indicadores de sostenibilidad de las termoeléctricas en la Amazonía: estudio de caso en Rondônia* (Vols. 19, núm. 36 (2020)). Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Obtenido de <https://repository.udem.edu.co/handle/11407/6528?show=full>
- Tsai, W.-T. (2010). Energy sustainability from analysis of sustainable development indicators: A case study in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.027>
- Tubet Abramo, C. (2016). *Diseño de una Metodología de Evaluación de la Sostenibilidad del Mix Eléctrico Nacional, basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP)*. Universidad de Cantabria. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/9150>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (06 de 03 de 2023). *Comunicados de Prensa*. Obtenido de Con asignación de 7.493 MW de solicitudes de conexión de proyectos de generación de energía eléctrica, Gobierno Nacional habilita Transición Energética Justa :

- https://www1.upme.gov.co/SalaPrensa/ComunicadosPrensa/Comunicado_02_2023_Solicitudes_Final.pdf
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2022). *Informe de gestión 2021*. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/InformesGestion/Informe_de_gestion_2021_UPME.pdf
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (02 de 2024). *Informe de Registro de Proyectos de Generación*. Obtenido de [chrome-extenhttps://www1.upme.gov.co/siel/Inscripcion_proyectos_generacion/Registro_febrero_2024.pdf](https://www1.upme.gov.co/siel/Inscripcion_proyectos_generacion/Registro_febrero_2024.pdf)
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (11 de 2023). *Proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica julio 2023 diciembre 2050*. (M. d. Energía, Ed.) Recuperado el 2024, de Publicaciones UPME: www1.upme.gov.co/sipg/Publicaciones_SIPG/Proyeccion_precios_energeticos_I_semestre_2023_vf.pdf
- Union Española Fotovoltaica UNEF. (03 de 2022). *Guía de mejores prácticas para el desarrollo de plantas solares*. Obtenido de <https://www.unef.es/es/descargar-documento/7e5c042d61f74bb452e6a7d92cf9cc38>
- UPME. (2024). *Observatorio de Energía*. Obtenido de Indicadores energéticos: <https://lookerstudio.google.com/embed/reporting/1cdae80b-62a7-4580-b954-661cbcd4496f/page/UP18B>
- Villazón, K. (2022). *Categorización de minerales críticos en Colombia para su uso en energía solar fotovoltaica*. Mellin: Universidad EAFIT. Obtenido de https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/31524/KarenCecilia_VillazonLobo_2022.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Wang, X., Xue, J., & Hou, X. (2023). Barriers analysis to Chinese waste photovoltaic module recycling under the background of "double carbon". *Renewable Energy*, 39-54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.137>
- Zapata Quinchía, A. (29 de 03 de 2024). Si este año entran los 66 proyectos renovables previstos, se podría iluminar una ciudad como Bogotá. *El colombiano*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/negocios/los-proyectos-de-energia-renovable-que-entrarian-en-2024-en-colombia-DL23827037>

Anexos

Los siguientes anexos contienen información de los artículos y/o documentos consultados para este trabajo de grado que son soporte de los capítulos desarrollados.

Anexo 1. Listado de los documentos consultados para este trabajo de grado

Tabla A 1

Base de datos de los 78 artículos y documentos seleccionados para este estudio

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|--|---|------|--|
| 1 | Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials | Harish Trivedi, Arunabh Meshram, Rajeev Gupta | 2023 | Módulos fotovoltaicos (PVM) Oblea de silicio (Si) Residuos electrónicos Disolución de solvente EVA Procesos de reciclaje de PVM |
| 2 | A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. | Osarumen O. Ogbomo, Emeka H. Amalu, N.N. Ekere, P.O. Olagbegi | 2016 | Módulos fotovoltaicos, Tecnología de células solares, Tecnología de contacto, Tecnología de interconexión, Tiempo de recuperación de energía, Eficiencia de conversión de energía, Vida fatigada |
| 3 | Environmental Sustainability and Exergetic Based Sustainability Indicators for Heat Exchanger-Evacuated Tube Assisted Drying System (HE-ETADS) | Anand Kushwah, Anil Kumar, Manoj Kumar Guar and Pranshu Shrivastava | 2023 | Sistemas de secado, Índice de sostenibilidad ambiental, Emisión de CO2 Energía incorporada, Tiempo de recuperación de energía |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|--|--|------|---|
| 4 | Analysis of the socio-economic feasibility of the implementation of an agroenergy condominium in western Paraná–Brazil | Claudinei de Almeida, Reinaldo Aparecido Bariccatti, Laercio Mantovani Frare, Carlos Eduardo Camargo Nogueira, Andrei Antônio Mondardo, Leonardo Contini, Gláucio José Gomes, Solles Augusto Rovaris, Kenia Gabriela dos Santos, Felipe Marques | 2016 | Condominio Biogás Agroenergía venganza |
| 5 | A comprehensive review on wind energy in Africa: Challenges, benefits and recommendations. | Solomon Boadu, Ebenezer Otoo, | 2023 | Energía eólica, Energía renovable, Parques eólicos, Industria de la energía eólica, África |
| 6 | Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects | Jochen Markard, Rob Raven, Bernhard Truffer | 2012 | Estudios de innovación, Sostenibilidad, Revisión de literatura |
| 7 | Mapping and navigating transitions—The multi-level perspective compared with arenas of development | Ulrik Jorgensen | 2012 | Teoría de la transición Regímenes sociotécnicos Arenas de desarrollo Mundos-actor Navegación de actores |
| 8 | Guía de mejores prácticas para el desarrollo de plantas solares | Unión Española Fotovoltaica UNEF | 2022 | Crisis climática Plantas solares Desarrollo sostenible |
| 9 | Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías | Organismo Internacional de Energía Atómica | 2008 | Indicadores energéticos Desarrollo sostenible |
| 10 | Informe basado en indicadores Edición 2020 | Observatorio de Energía y sostenibilidad 2020 | 2020 | Energía modelo energético sostenible |
| 11 | Política mexicana e indicadores de sustentabilidad | Claudica Sheinbaum Pardo, Víctor Rodríguez Padillas, Guillermo Robles Morales | 2009 | Energía, desarrollo sustentable, indicadores, México, política energética. |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|--|--|------|---|
| 12 | Indicadores de Desarrollo Energético Sustentable. Caso: Quintana Roo, México | Hernández-Rodríguez, José; Acosta-Olea, Roberto; Barbosa-Pool, Gliserio Romeli; Aguilar-Aguilar, Jorge Ovidio; Chargoy-Rosas, Mónica Ariadna; Quinto-Diez, Pedro | 2016 | desarrollo sustentable, indicadores energéticos, Quintana Roo, México. |
| 13 | Análisis e interpretación de indicadores energéticos para el desarrollo sostenible de Guatemala | Sergio Manuel Melendez Mendizabal | 2014 | desarrollo sostenible, indicadores energéticos Guatemala |
| 14 | Indicadores del desarrollo energético sostenible | Organismo Internacional de Energía Atómica | | Indicadores energéticos Desarrollo sostenible |
| 15 | Energías renovables y desarrollo económico. Un análisis para España y las grandes economías europeas | María Ángeles Caraballo Pou, Juana María García Simón | 2017 | Sostenibilidad Desarrollo económico energía renovable energía no renovable clasificación JEL:O44, Q43 |
| 16 | Diseño de una Metodología de Evaluación de la Sostenibilidad del Mix Eléctrico Nacional, basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) | Carolina Tubet Abramo | 2016 | Evaluación de la sostenibilidad sistema eléctrico español |
| 17 | Análisis comparativo de energía incorporada y emisiones de CO2 para sistemas térmicos fotovoltaicos | V. Tirupati Rao, Y. Raja Sekhar | 2021 | Sistema térmico fotovoltaico (PVT) Tiempo de recuperación de la energía (EPBT) CO2 mitigaciones CO2 emisiones Crédito de carbono obtenido (CCE) |
| 18 | Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review | Irtiqah Shabir, Kshirod Kumar Guión, Aamir Hussain Dar, Vinay Kumar Pandey, Ufaq Fayaz, Shivangi Srivastava, Nisha R | 2023 | Gases de invernadero Entorno sostenible Cadena de suministro de alimentos Evaluación del ciclo de vida Producción de agricultura |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|--|---|------|---|
| 19 | Environmental, energy security, and energy equity (3E) benefits of net-zero emission strategy in a developing country: A case study of Nepal | Shree Raj Shakya, Hombre Amrit Nakarmi, Anita Prajapati, Bijay Bahadur Pradhan, Utsav Shree Rajbhandari, Maheswar Rupakheti, Mark G. Lawrence | 2023 | Cero emisiones netas Equidad energética Seguridad energética Contaminantes atmosféricos Beneficios colaterales Plataforma de análisis de bajas emisiones |
| 20 | Una política energética para Colombia con asequibilidad, seguridad y sostenibilidad | Daniel Enrique Medina | 2023 | Transición energética Colombia |
| 21 | Recomendaciones ACIEM para enfrentar riesgos de abastecimiento de energía eléctrica y gas natural | ENERCOL | 2023 | energía eléctrica Colombia Gas natural Riesgos |
| 22 | Institucionalidad del sector eléctrico de 30 años se debe mantener y fortalecer | ENERCOL | 2023 | Desarrollo sector eléctrico Colombia |
| 23 | Retos de la transición energética a nivel mundial | Rafael Scott | 2023 | Transición energética |
| 24 | How do energy resources and financial development cause environmental sustainability? | Kishwar Ali, Du Jianguo, Dervis Kirikkaleli | 2023 | Sostenibilidad del medio ambiente, Recursos energéticos, Desarrollo financiero |
| 25 | Energía y desarrollo sustentable en America Latina y el Caribe | German Agency for Technical Cooperation-NU. CEPAL-OLADE | 2003 | políticas energéticas Desarrollo sustentable América Latina y el Caribe |
| 26 | Comprehensive evaluation of renewable energy development level based on game theory and TOPSIS | Ya-Jun Leng , Huan Zhang | 2022 | Desarrollo de energías renovables Sistema de índice Teoría de juego TOPSIS |
| 27 | Towards sustainable environment in Somalia: The role of conflicts, urbanization, and globalization on environmental degradation and emissions. | Abdimalik Ali Warsame, Abdikafi Hassan Abdi, Amir Yahya Amir, ONO Azman-Saini | 2023 | Deforestación Emisiones de GEI Conflictos Urbanización Globalización Somalia |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|--|---|------|---|
| 28 | Electricity from renewable energy resources: Sustainable energy transition and emissions for developed economies | Chunjiao Gao, Hongxi Chen | 2023 | Emisiones de carbono basadas en el consumo Electricidad procedente de fuentes renovables I+D en energías renovables Impuestos ambientales Tecnologías ambientales |
| 29 | Economic and environmental prioritisation of potential retrofitting interventions in electricity decarbonisation scenarios: Application to a heritage building used as offices | Daniel Gonzalez-Prieto, Yolanda Fernandez-Nava, Laura Megido, María Manuela Prieto | 2023 | Eficiencia energética de los edificios Evaluación ambiental Indicadores de inversión Rehabilitación de edificios Evaluación del ciclo de vida optimización de Pareto |
| 30 | Circular economy performance and carbon footprint of wind turbine blade waste management alternatives | Borja Diez-Cañamero, Joan Manuel F. Mendoza | 2023 | Indicadores de circularidad Evaluación del ciclo de vida pirólisis Energía renovable Solvólisis Transición energética sostenible |
| 31 | Energy paybacktime (EPBT and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis | Khagendra P. Bhandari, Jennifer M. Collier, Randy J. Ellingson, Defne S. Apul | 2015 | Tiempo de recuperación de energía fotovoltaica Retorno energético de la energía invertida Energía incorporada |
| 32 | Energy performance of perovskite solar cell fabrication in Argentina. A life cycle assessment approach | Natalia B. Correa Guerrero, Walter O. Herrera Martínez, Bárbara Civit, M. Dolores Pérez | 2021 | Evaluación del ciclo de vida Células solares de perovskita Tiempo de recuperación de energía Retorno energético de la inversión |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|--|--|-------|---|
| 33 | Environmental and economic performance assessment of integrated conventional solar photovoltaic and agrophotovoltaic systems | MM Junedi, NA Ludin, NH Hamid, PR Kathleen, J. Hasila, NA Ahmad Affandi | 2022 | Gases de efecto invernadero (GEI) Tiempo de recuperación de la energía (EPBT) Coste nivelado de la energía (LCOE) Sistema fotovoltaico Sistema agrofotovoltaico (AgroPV) |
| 34 | A combined assessment of the energy, economic and environmental performance of a photovoltaic system in the Italian context | Annarita Paiano, Giovanni Lagioia, Carlo Ingraio | 2023 | Sistema fotovoltaico residencial Silicio cristalino Evaluación de indicadores de desempeño Indicadores energéticos y ambientales Indicadores financieros y económicos. |
| 35 | Objectives, Keys and Results in the Water Networks to Reach the Sustainable Development Goals. | Angel Valentín Mercedes Garcia , Petra Amparo López-Jiménez , Francisco-Javier Sánchez-Romero y Modesto Pérez-Sánchez. | 2021. | redes de agua, sostenibilidad, indicadores de sostenibilidad, recuperación de energía, emisiones de efecto invernadero |
| 36 | Development of building driven-energy payback time for energy transition of building with renewable energy systems | Minjin Kong, Taehoon Hong Changyoon Ji, Hyuna Kang, Minhyun Lee | 2020 | Análisis energético del ciclo de vida (LCEA), Tiempo de recuperación de la energía (EPBT), Construcción de transición energética, Política energética de edificios, Generación de energía renovable en sitio. |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|---|---|------|--|
| 37 | Life cycle analysis of the economic costs and environmental benefits of photovoltaic module waste recycling in China | Jing Li, Jiali Shao, Xilong Yao, Jiashuo LI | 2023 | Paneles fotovoltaicos de desecho, análisis costo-beneficio, Reciclaje mecánico, Reciclaje térmico, Reciclaje químico |
| 38 | Review on recycling of solar modules/panels | A. Divya, T. Adish, P. Kaustubh, P.S. Zade | 2023 | Gestión de residuos, Reciclaje de módulos solares, Energía solar fotovoltaica, Soluciones energéticas e impacto ambiental |
| 39 | Barriers analysis to Chinese waste photovoltaic module recycling under the background of "double carbon" | Xintong Wang, Jingguo Xue, Xueliang Hou | 2023 | Módulos fotovoltaicos Reciclaje Barreras Laboratorio de ensayo y evaluación de la toma de decisiones y modelación estructural interpretativa (DEMATEL-ISM) Recomendaciones de política |
| 40 | Life cycle energy, economic, and environmental analysis for the direct-expansion photovoltaic-thermal heat pump system in China | Lei Liua, Wenjie Liua, Jian Yao, Teng Jia, Yao Zhao, Yanjun Dai | 2023 | Evaluación del ciclo de vida Análisis energético, económico y medioambiental. Sistema de bomba de calor fotovoltaico-térmica |
| 41 | Quantifying power system flexibility for the energy transition in Colombia | Antonio Gonzalez-Dumar, Santiago Arango-Aramburo, Carlos M. Correa-Posada | 2023 | sistema eléctrico colombiano Requisitos de flexibilidad Carga neta Fuentes de energía no convencionales Flexibilidad del sistema de energía |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|---|--|------|---|
| 42 | Review of indicators for sustainable energy development | I. Gunnarsdottir, B. Davidsdottir, E. Worrell, S. Sigurgeirsdottir | 2020 | Desarrollo energético sostenible Indicadores de sostenibilidad Indicadores energéticos Desarrollo de indicadores Revisión de literatura La política energética |
| 43 | Suitable municipalities for biomass energy use in Colombia based on a multicriteria analysis from a sustainable development perspective | Maria Jisset Calvo-Saad, Juan Sebastian Solís-Chaves, Walter Murillo-Arango | 2023 | Proceso de jerarquía analítica Biomasa Colombia Sistemas de información geoespacial Análisis de decisiones multicriterio Desarrollo sostenible QGIS Fuentes de energía renovable Suma de rangos Combinación lineal ponderada |
| 44 | Classification of stakeholders of sustainable energy development in Iceland: Utilizing power-interest matrix and fuzzy logic theory | Bjarnhéðinn Guðlaugsson, Reza Fazeli, Ingunn Gunnarsdóttir, Brynhildur Davidsdottir, Gunnar Stefansson | 2020 | Análisis de los interesados Matriz de poder-interés de las partes interesadas Desarrollo energético sostenible Clasificación de partes interesadas Lógica difusa |
| 45 | Indicators for sustainable energy development: An Icelandic case study | I. Gunnarsdottira, B. Davidsdottira, E. Worrell, S. Sigurgeirsdottira | 2022 | Desarrollo energético sostenible Indicadores de sostenibilidad Indicadores energéticos Desarrollo de indicadores Participación de los interesados La política energética |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|--|--|------|--|
| 46 | Experimental techno-economic analysis of an autonomous photovoltaic system operating in Chocó, Colombia | William Murillo, Hector D. Agudelo, Maycol F. Mena, Edison Banguero, Reiner Palomino, Samir Córdoba, Andres J. Aristizábal | 2023 | Energía solar fotovoltaica BIPVS Energía solar Renovables Rendimiento BIPVS |
| 47 | Solar photovoltaic deployment acceleration model to advance the sustainability of buildings in public universities in South Africa | Nutifafa Geh, Fidelis Emuze, Dillip Kumar Das | 2023 | Barreras Conductores Instituciones de educación superior Modelo de aceleración del despliegue fotovoltaico PLS-SEM Sudáfrica |
| 48 | Energy payback time analysis and return on investment of off-grid photovoltaic systems in rural areas of Tanzania | Yooko Tsuchiya, Tobias A. Swai, Fumiyuki Goto | 2020 | Energía renovable Fotovoltaica Tiempo de recuperación de energía Inversión Electrificación |
| 49 | Can we have clean energy and grow our crops too? Solar siting on agricultural land in the United States | Sharlissa Moore, Hannah Graff, Carolyn Ouellet, Skyler Leslie, Danny Olweean | 2022 | Emplazamiento solar a escala de servicios públicos Solar en terrenos agrícolas Agrivoltaica Tierras de cultivo de primera Participación de los interesados Nexo entre alimentos y energía |
| 50 | Challenges and perspectives of the use of photovoltaic solar energy in Colombia | Christian Manuel Moreno Rocha, Celene Milanés Batista, William Fernando Arguello Rodríguez, Arley Jesús Fontalvo Ballesteros, José Ricardo Núñez Álvarez | 2022 | Problema ambiental Sistema solar fotovoltaico Energía renovable Energía solar Proyectos de energía solar |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|---|--|------|---|
| 51 | The dilemma in energy transition in Malaysia: A comparative life cycle assessment of large scale solar and biodiesel production from palm oil | Zhen Xin Phuang, Zuchao Lin, Peng Yen Liew, Marlia Mohd Hanafiah, Kok Sin Woon | 2022 | Emisiones incorporadas Impactos ambientales Transformación de la tierra Análisis del ciclo de vida. Biodiésel de palma Implicación de política |
| 52 | Critical sustainability issues in the production of wind and solar electricity generation as well as storage facilities and possible solutions | Sophie Theresia Huber Karl W. Steininger | 2022 | Riesgos de la cadena de suministro Tecnologías de energías renovables Estaño Extraños elementos de la Tierra Cobalto Litio |
| 53 | Solar panels salvaging for safety & sustainability | Kartik Rathi, Bhavesh Vyas, Puja Acharya, Jayesh Vyas, Anil Dixit | 2022 | Eliminación de desechos electrónicos Fin de la vida solar Evaluación Proceso de reciclaje solar sostenible |
| 54 | Environmental and technical impacts of floating photovoltaic plants as an emerging clean energy technology | Hamid M. Pouran, Mariana Padilha Campos Lopes, Tainan Nogueira, David Alves Castelo Branco, and Yong Sheng | 2022 | Ciencias Aplicadas Sostenibilidad energética Ingeniería verde |
| 55 | Indicadores de sostenibilidad de las termoeléctricas en la Amazonía, estudio de caso en Rondônia | Torres do Amaral, C; de Souza, A; Carvalho | 2019 | desarrollo sostenible; indicadores; termoeléctrico; desenvolvimiento sustentable; indicadores; plantas termoeléctricas |
| 56 | Determinación de un indicador para la medición del sistema de aprovechamiento y uso energético eficiente de la madera, en huertos leñeros y estufas ecológicas en la jurisdicción de Corpoquavio - Brasil | Nunyl Diaz | 2015 | Estufas ecológicas, huertos leñeros, combustible, eficiencia energética, |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|--|--|------|---|
| 57 | Desarrollo sostenible y sus indicadores | Arias,F | 2006 | Desarrollo sostenible, indicadores de desarrollo sostenible, equidad intergeneracional. |
| 58 | Uso de indicadores sociales en estudios de factibilidad de instalación de sistemas solares para generación de electricidad en zonas rurales de la provincia de Salta | Ottavianelli,E; Ibarra,M y Cadena, C | 2013 | energía solar, índice social, rural dispersa, |
| 59 | Documentación gráfica para la obtención de indicadores de sostenibilidad en la rehabilitación de la vivienda social y la regeneración urbana | Hernández, L; Fernández, A y Peinado, Z | 2014 | vivienda social, regeneración urbana, captura de datos, |
| 60 | Oportunidad comercial para la importación de paneles solares fotovoltaicos y sus accesorios a Colombia | Contreras, L | 2020 | energías renovables, paneles solares, condiciones económicas, políticas y tecnológicas, consumo, comercial. |
| 61 | Últimos desarrollos relacionados con la fabricación y el ensayo de paneles solares y componentes para usos espaciales | Alurralde, M; Barrera, M; Bolzi,C; Bruno,C; Durán,J; Fernández,J; Filevich; Godfrin,E; Goldbeck,V; Iglesias,A; Martínez, M; Mezzabolta,E; Nigro,S; Plá,J; Prario,I; Raffo,M; Rodríguez,S; Tamasi,M; Vertanessian,A; Antonuccio,F; Cabot,P; Carella,E; Franciulli,C; Moglioni, A. | 2004 | Energía solar ; Energía Fotovoltaica ; paneles solares ; uso espacial ; Ensayos ; ambiente espacial ; ensayos eléctricos |
| 62 | Análisis espacial multicriterio para la ubicación de parques eólicos y granjas solares en Colombia | García, S | 2021 | Toma de Decisiones Multicriterio, Fuentes No Convencionales de Energía Renovable, Restricciones Ambientales, Sistemas de Información Geográfica |
| 63 | Estimación de la vida útil de baterías en sistemas fotovoltaicos. Influencia de la gestión energética del sistema. | Lopez, A | 2018 | baterías, sistemas fotovoltaicos, vida útil, Energía solar fotovoltaica , energía eléctrica |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|--|--|------|--|
| 64 | Análisis de ciclo de vida de sistemas solares fotovoltaicos policristalinos centralizados en instalaciones de generación distribuida para autoconsumo | Castillo,V | 2019 | Análisis de Ciclo de Vida, ciclo de vida, energía solar fotovoltaica, policristalino |
| 65 | Energías renovables un futuro óptimo para Colombia | Medina, S | 2018 | Energías renovables, IRENA, Perú, Colombia, Desarrollo sostenible, ONU, Fuentes energéticas. |
| 66 | Planeación de proyectos en construcción sostenible de edificaciones en Colombia | Guerrero,I | 2021 | Medio ambiente, Mitigación de riesgos, Proyectos de construcción, Sostenibilidad, |
| 67 | Guía metodológica diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible | Schuschny, A.; Soto, H. / CEPAL | 2009 | Indicadores Desarrollo sostenible |
| 68 | Metodología para proyecciones de demanda de energía eléctrica y gas natural | UPME | 2020 | Energía eléctrica Colombia Gas natural |
| 69 | Energías renovables no convencionales en Colombia y su proyección para el año 2030 | Cardona, S & Andrade, Laura. | 2021 | Gases efecto invernadero, cambio climático, calentamiento global, energía eólica, energía solar, hidrógeno verde, transición energética, mercado energético. |
| 70 | Escenario de desarrollo energético sostenible en Colombia 2017-2030 | Moreno, R., López; U. & Quispe, E. C | 2018 | Eficiencia energética, fuentes no convencionales de energía, planeamiento energético, crecimiento verde, desarrollo económico |
| 71 | Análisis y perspectivas de la implementación de tecnologías limpias para la generación de energía en Colombia | Ramos, M; Hernandez, D; Pérez, H & Cardenas, E | 2019 | energías renovables matriz energética, fuentes no convencionales de energía regulación e incentivos en energías renovables |
| 72 | An intuitionistic fuzzy based hybrid decision-making approach to determine the priority value of indicators and its application to solar energy feasibility analysis | Priyanka Majumdera, Priyansha Bhowmikb, Amrit Dasc, Tapan Senapatid, Vladimir Simice, Dragan Pamucar | 2023 | IF-FUCOM-AHP Energía solar Factibilidad Valor de prioridad |

| Ítem | Título | Autores | Año | Palabras clave |
|------|---|---|------|--|
| 73 | Environmental impacts of utility-scale solar energy | R.R. Hernandez, S.B. Easter, M.L. Murphy-Mariscal, F.T. Maestre, M. Tavassoli, E.B. Allen, C.W. Barrows, J. Belnap, R. Ochoa-Hueso, S. Ravi, M.F. Allen | 2013 | Biodiversidad Conservación Desierto Emisiones de gases de efecto invernadero Uso de la tierra y cambio de cobertura del suelo Fotovoltaica Energía renovable |
| 74 | Assessing energy technologies sustainability: upscaling photovoltaics using absolute LCA | L. Riondet, M. Rio, V. Perrot-Bernardet, P. Zwolinski | 2023 | Ampliación Diseño integrado de productos y tecnología Sostenibilidad absoluta Transición energética |
| 75 | Energías renovables e impactos en los servicios ecosistémicos | Richard Hastik, Stefano Basso, Clemens Geitner Christin Haida, Aleš Poljanec, Alessia Portaccio, Borut Vrščaj, Chris Walzer | 2015 | Energías renovables Servicios ecosistémicos Alpes Conflictos medioambientales |
| 76 | Solar plants, environmental degradation and local socioeconomic contexts: A case study in a Mediterranean country | Lavinia Delfanti, Andrea Colantoni, Fabio Recanatesi, Massimiliano Bencardino, Adele Sateriano, Ilaria Zambon, Luca Salvati | 2016 | Sombreado del suelo Zona rural Encuesta nacional Municipio Análisis multivariante Italia |
| 77 | Energy sustainability from analysis of sustainable development indicators: A case study in Taiwan | Wen/Tien Tsai | 2010 | Desarrollo sostenible Indicador de energía Energías renovables Política energética |
| 78 | Proyección de la demanda de energía eléctrica, potencia máxima y gas natural 2023 - 2037 | Ministerio de Minas y energía UPME | 2024 | Energía Electrica Colombia |

Nota. Elaboración propia

Anexo 2. Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías de la OIEA

*Tabla A 2
Lista de indicadores sociales energéticos del desarrollo sostenible*

| Social | | | | |
|---------------|----------------|-----------------------------|--|---|
| Tema | Subtema | Indicador energético | | Componentes |
| Equidad | Accesibilidad | SOC1 | Porcentaje de hogares (o de población) sin electricidad o energía comercial, o muy dependientes de energías no comerciales | <ul style="list-style-type: none"> – Hogares (o población) sin electricidad o energía comercial, o muy dependientes de energías no comerciales – Numero total de hogares o población total |
| | Asequibilidad | SOC2 | Porcentaje de ingresos de los hogares dedicado a combustibles y electricidad | <ul style="list-style-type: none"> – Ingresos de los hogares dedicados a combustibles y electricidad – Ingresos de los hogares (del total y del 20% más pobre de la población) |
| | Disparidades | SOC3 | Uso de energía en los hogares por grupo de ingresos y combinación de combustibles utilizados | <ul style="list-style-type: none"> – Uso de energía por hogar para cada grupo de ingresos (quintiles) – Ingresos del hogar por cada grupo de ingresos (quintiles) – Combinación de combustibles utilizada por cada grupo de ingresos (quintiles) |
| Salud | Seguridad | SOC4 | Víctimas mortales de accidentes por la energía producida por la cadena de combustibles | <ul style="list-style-type: none"> – Víctimas mortales anuales |

Nota. Recuperado de Organismo de Internacional de Energía Atómica, 2008, Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías. <https://www.iaea.org/books>

Tabla A 3

Lista de indicadores ambientales energéticos del desarrollo sostenible

| Medio ambiente | | | | |
|----------------|--|----------------------|--|--|
| Tema | Subtema | Indicador energético | | Componentes |
| Atmósfera | Cambio climático | ENV1 | Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por la producción y uso de energía, <i>per cápita</i> y por unidad de PIB | <ul style="list-style-type: none"> Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por la producción y uso de energía Población y PIB |
| | Calidad del aire | ENV2 | Concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos en zonas urbanas | <ul style="list-style-type: none"> Concentración de contaminantes de la atmósfera |
| | | ENV3 | Emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes de los sistemas energéticos | <ul style="list-style-type: none"> Emisiones contaminantes a la atmósfera |
| Agua | Calidad del agua | ENV4 | Descargas de contaminantes en efluentes líquidos procedentes de los sistemas energéticos incluidas las descargas de petróleo | <ul style="list-style-type: none"> Descargas de contaminantes en efluentes líquidos |
| Tierra | Calidad de los suelos | ENV5 | Zonas del suelo en las que la acidificación supera la carga crítica | <ul style="list-style-type: none"> Zona del suelo afectada Carga crítica |
| | Bosques | ENV6 | Tasa de deforestación atribuida al uso de energía | <ul style="list-style-type: none"> Zona forestal en dos momentos diferentes Utilización de la biomasa |
| | Generación y gestión de desechos sólidos | ENV7 | Relación entre la generación de desechos sólidos y las unidades de energía producida | <ul style="list-style-type: none"> Cantidad de desechos sólidos Energía producida |
| | | ENV8 | Relación entre los desechos sólidos adecuadamente evacuados y el total de desechos sólidos generados | <ul style="list-style-type: none"> Cantidad de desechos sólidos adecuadamente evacuados Cantidad total de desechos sólidos |
| | | ENV9 | Relación entre los desechos sólidos radiactivos y las unidades de energía producida | <ul style="list-style-type: none"> Cantidad de desechos radiactivos (acumulación durante un periodo de tiempo determinado) Energía producida |
| | | ENV10 | Relación entre los desechos sólidos radiactivos en espera de evacuación y el total de desechos sólidos radiactivos generados | <ul style="list-style-type: none"> Cantidad de desechos radiactivos a la espera de su evacuación Volumen total de desechos radiactivos |

Nota. Recuperado de Organismo de Internacional de Energía Atómica, 2008, Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías. <https://www.iaea.org/books>

Tabla A 4
Lista de indicadores económicos energéticos del desarrollo sostenible

| Económico | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|----------------------|---|--|---|
| Tema | Subtema | Indicador energético | | Componentes | |
| Patrones de uso y producción | Uso global | ECO1 | Uso de energía <i>per capita</i> | <ul style="list-style-type: none"> – Uso de energía (suministro total de energía primaria, consumo final total y uso de electricidad) – Población total | |
| | Productividad global | ECO2 | Uso de energía por unidad de PIB | <ul style="list-style-type: none"> – Uso de energía (suministro total de energía primaria, consumo final total y uso de electricidad) – PIB | |
| | Eficiencia del suministro | ECO3 | Eficiencia de la conversión y distribución de energía | <ul style="list-style-type: none"> – Pérdidas en los sistemas de transformación incluidas las pérdidas en la generación, transmisión y distribución de electricidad | |
| | Producción | | ECO4 | Relación reservas/ producción | <ul style="list-style-type: none"> – Reservas recuperables comprobadas – Producción total de energía |
| | | | ECO5 | Relación recursos/ producción | <ul style="list-style-type: none"> – Recursos totales estimados – Producción total de energía |
| | Uso final | | ECO6 | Intensidades energéticas de la industria | <ul style="list-style-type: none"> – Uso de energía en el sector industrial y por rama de manufacturas – Valor agregado correspondiente |
| | | | ECO7 | Intensidades energéticas del sector agrícola | <ul style="list-style-type: none"> – Uso de energía en el sector agrícola – Valor agregado correspondiente |
| | | | ECO8 | Intensidades energéticas del sector comercial/de los servicios | <ul style="list-style-type: none"> – Uso de energía en el sector de los servicios/comercial – Valor agregado correspondiente |
| | | | ECO9 | Intensidad energética de los hogares | <ul style="list-style-type: none"> – Uso de energía en los hogares y por usos finales clave – Numero de hogares, superficie edificada, personas por hogar, aparatos electrodomésticos. |
| | | | ECO10 | Intensidades energéticas del transporte | <ul style="list-style-type: none"> – Uso de energía en el transporte de pasajeros y de carga, y por modalidad – Pasajeros/km recorridos y toneladas/km de carga transportada, y por modalidad |

| Económico | | | | |
|------------------------------|---|----------------------|---|---|
| Tema | Subtema | Indicador energético | | Componentes |
| Patrones de uso y producción | Diversificación (Combinación de combustibles) | ECO11 | Porcentajes de combustibles en la energía y electricidad | <ul style="list-style-type: none"> – Suministro de energía primaria y consumo final, generación de electricidad y capacidad de generación por tipo de combustible – Suministro total de energía primaria, consumo final total de energía, generación de electricidad total y capacidad total de generación |
| | | ECO12 | Porcentaje de energía no basada en el carbono en la energía y electricidad | <ul style="list-style-type: none"> – Suministro primario, generación de electricidad y capacidad de generación por energía no basada en el carbono – Suministro total de energía primaria, generación total de electricidad y capacidad total de generación |
| | | ECO13 | Porcentaje de energías renovables en la energía y electricidad | <ul style="list-style-type: none"> – Suministro de energía primaria, consumo final y generación de electricidad y capacidad de generación por energías renovables – Suministro total de energía primaria y consumo final total de energía, generación de electricidad total y capacidad de generación total |
| | Precios | ECO14 | Precios de la energía de uso final por combustible y sector | <ul style="list-style-type: none"> – Precios de la energía (con y sin impuestos/subvenciones) |
| Seguridad | Importaciones | ECO15 | Dependencia de las importaciones netas de energía | <ul style="list-style-type: none"> – Importaciones de energía – Suministro total de energía primaria |
| | Reservas estratégicas de combustibles | ECO16 | Reservas de combustibles críticos por consumo del combustible correspondiente | <ul style="list-style-type: none"> – Reservas de combustibles críticos (por ejemplo, petróleo, gas, etc.) – Consumo de combustibles críticos |

Nota. Recuperado de Organismo de Internacional de Energía Atómica, 2008, Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías. <https://www.iaea.org/books>

Anexo 3. Objetivos e indicadores seleccionados de sustentabilidad energética del estudio de la CEPAL

Tabla A 5
Indicadores seleccionados de sustentabilidad energética.

| Recuadro 8 INDICADORES SELECCIONADOS DE SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA | | |
|---|--|--|
| Indicador | Alta sustentabilidad se relaciona con: | Responde a objetivos: |
| Autarquía energética | Baja participación de las importaciones en la oferta energética | - seguridad del abastecimiento externo - sostenimiento del espacio de maniobra para la política (alto grado de independencia política) - reducción del riesgo de desequilibrio en el balance de pagos |
| Robustez frente a cambios externos | Baja contribución de las exportaciones energéticas al PIB | - flujos estables de ingresos de las exportaciones - menor peso de ingresos variables en el presupuesto - reducción del riesgo de desequilibrio en el balance de pagos |
| "Productividad" energética | Alto PIB por unidad de energía | - eficiencia productiva - eficiencia energética - financiamiento suficiente (por reducción de necesidades de inversión en el sector) - reducción de costos del suministro energético - abastecimiento suficiente (por reducción de la demanda) - mejor calidad del aire (por reducción de emisiones con efecto local) - reducción de emisiones de gases con efecto climático - extensión de alcance de los recursos no renovables |
| Cobertura eléctrica | Alto porcentaje de hogares electrificados | - diversificación del mix energético - abastecimiento suficiente - acceso a energéticos modernos y productivos - abastecimiento de servicios sociales |
| Cobertura de necesidades energéticas básicas | Suficiente consumo de energía útil residencial | - satisfacción de necesidades básicas - diversificación del mix energético - manejo sostenible de la leña |
| Pureza relativa del uso de energía | Bajos niveles de emisiones (de CO ₂) | - mejor calidad del aire (por reducción de emisiones con efectos locales y regionales) - reducción de emisiones de gases con efecto climático |
| Uso de energías renovables | Alta participación de energías renovables en la oferta energética | - mejor calidad del aire (por reducción de emisiones con efectos locales y regionales) - reducción de emisiones de gases con efecto climático |
| Alcance recursos fósiles y leña | Alto nivel de relación reservas/producción de energéticos fósiles y leña | - extensión del alcance de recursos al largo plazo - seguridad de suministro al largo plazo - mantenimiento de un mínimo de patrimonio natural |

Fuente: OLADE/CEPAL/GTZ, Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe. Enfoques para la política energética, Quito, mayo de 1997.

Tabla A 6
Objetivos de la política energética tendientes al desarrollo sustentable

| Cuadro 4 OBJETIVOS DE LA POLÍTICA ENERGÉTICA TENDIENTES AL DESARROLLO SUSTENTABLE | |
|---|---|
| Dimensión política | Soberanía e independencia nacional Espacio de maniobra amplio para la política Influencia internacional del país Seguridad de las instalaciones del sector energético ante conflictos Equilibrio del poder político-económico (estatal y privado) |
| Dimensión económica | Eficiencia económica Eficiencia productiva Eficiencia estructural Seguridad del suministro energético Externa: continuidad en las importaciones Interna: continuidad en el abastecimiento Calidad de productos energéticos Impacto macroeconómico favorable En el PIB En la inflación En la balanza comercial En el empleo En la formación bruta de capital fijo En las finanzas públicas Flujo estable de ingresos fiscales Autosuficiencia energética razonable Captación de las rentas económicas por parte del Estado Recursos del subsuelo Recursos hídricos Racionalidad en el uso de las rentas asociadas a las fuentes de energía Mayor valor agregado en las cadenas energéticas Productos más elaborados Oferta diversificada de servicios Confianza de los actores en la regulación y el ente regulador |
| Dimensión social | Cobertura total de los requerimientos básicos de energía de la población Costo mínimo para los hogares Oferta energética diversificada Continuidad del suministro Acceso a las fuentes de mayor calidad Existencia de fuentes de financiamiento para la compra de equipos |
| Dimensión ambiental | Aire, agua y suelo libres de contaminantes Biodiversidad fuera de peligro en su ambiente natural Ecosistemas escasamente perturbados Uso sostenible de la leña Racionalidad en la explotación de los recursos energéticos fósiles Racionalidad en el manejo de las cuencas hídricas |

Fuente: Elaborado sobre la base de OLADE/CEPAL/GTZ, Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe: guía para la formulación de políticas energéticas, Quito, julio de 2000.

Anexo 4. Criterios de evaluación del conjunto de indicadores con los Principio del SELLO Bellagio.

Tabla A 7

Criterios de evaluación del conjunto de indicadores con los Principio del SELLO Bellagio

| Criterios | Razón fundamental | Principio del SELLO Bellagio | Mensurabilidad |
|--|---|-------------------------------------|--|
| 1. Transparencia en la selección de indicadores | Es necesario hacer que las opciones metodológicas para la selección de indicadores y los indicadores subyacentes de un conjunto de indicadores estén disponibles para garantizar la credibilidad y legitimidad de un conjunto de indicadores. | Principio 5: Transparencia | 1/2 - Indicadores individuales 1/2 - Metodología para la selección de indicadores 0 - Ninguno de los anteriores y sin análisis adicional |
| 2. Transparencia en la aplicación de indicadores | La utilidad de un conjunto de indicadores depende de la divulgación de la información necesaria para la aplicación del indicador y las fuentes de datos. | Principio 5: Transparencia | 1/2 - Metodología para la aplicación de indicadores 1/2 - Fuentes de datos 0 - El conjunto de indicadores no se vuelve a calcular fácilmente |
| 3. Marco conceptual | La aplicación de un marco teórico ayuda a estructurar el problema y puede aumentar su exhaustividad. Se puede mejorar la transparencia de la selección de indicadores y minimizar el sesgo. | Principio 4: Marco e indicadores | 1 - Marco conceptual 0 - Sin marco aparente |

| Criterios | Razón fundamental | Principio del SELLO Bellagio | Mensurabilidad |
|--|--|--|--|
| 4. Representante | El conjunto de indicadores debe ser representativo del desarrollo energético sostenible, que incluye la consideración de las dimensiones económica, social y ambiental. | Principio 2: Consideraciones esenciales | 1/3 Económico 1/3 - Social 1/3 - Ambiental 0 - Ninguno de los anteriores |
| 5. Vínculos | Para mejorar aún más un conjunto de indicadores, se deben considerar los vínculos de los indicadores individuales para mostrar una imagen completa y eliminar los indicadores correlacionados. | Principio 2: Consideraciones esenciales | 1 - Análisis de regresión de indicadores o cadena causal o marco de sistemas o presentación de indicadores conectados o declaró que se consideraron vínculos 0 - No considerado |
| 6. Participación de las partes interesadas | La participación de las partes interesadas durante la selección de indicadores aumenta la solidez y representatividad de un conjunto de indicadores. Aumenta la aceptación de las partes interesadas y reduce el potencial de sesgo en la selección. | Principio 7: Amplia participación | 1 - Partes interesadas o expertos externos involucrados 0 - No, no está claro si se hizo |

Nota. Fuente: (Gunnarsdottir, Davidsdottir, Worrell, & Sigurgersdottir, 2020)

Anexo 5. Indicadores del SED para Islandia

Se identificaron seis temas principales de SED para Islandia y sus indicadores:

1. La conservación de la naturaleza donde uno de los objetivos es minimizar el impacto ambiental del desarrollo energético y reducir la contaminación visual del sistema energético;

Tabla A 8
Indicadores para el tema de conservación de la naturaleza.

| Tema | Subtema | Indicador | Referencia |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|-------------------|
| Conservación natural | Proteger la naturaleza | Área total de impacto de las centrales eléctricas. | 1 |
| | Minimizar la contaminación visual | Participación subterránea del sistema de transmisión y distribución. | Original |
| | | Área total de impacto de las centrales eléctricas. | 1 |

1. Comité directivo, 2016 .

Nota. Fuente: (Gunnarsdottir, Davidsdottir, Worrellb, & Sigurgeirsdottirc, 2022)

2. beneficios sociales donde las partes interesadas coincidieron en la importancia de una mayor participación pública y un debate más informado;

Tabla A 9
Indicadores para el tema de beneficios sociales.

| Tema | Subtema | Indicador | Referencia |
|----------------------------|--|--|-------------------|
| Beneficios sociales | Aceptación pública | Participación pública en la formulación de políticas relacionadas con la energía | 2, 4 |
| | | Transparencia de la formulación de políticas gubernamentales | 3 |
| | Beneficiarse del desarrollo energético | Iniciativas socialmente beneficiosas | 2 |
| | | Creación de empleo | 4–6 |
| | Creación de conocimiento y avances tecnológicos. | Gasto total en I+D dentro del sector energético | 5, 11 |

| Tema | Subtema | Indicador | Referencia |
|------|---------|---|------------|
| | | Número de patentes en el sector energético | 3,5 |
| | | IED y transferencia de tecnología | 3 |
| | | Capacidad de innovación | 3 |
| | | Colaboración universidad-industria en índice de I+D | 3 |

2. Austurbrú, sf , 3. Consejo Mundial de la Energía y Oliver Wyman, 2017 , 4. Neves y Leal, 2010 , 5. Sovacool y Mukherjee, 2011 , 6. Shortall et al., 2015 , 11. SDSN, 2014 .

Nota. Fuente: (Gunnarsdottir, Davidsdottir, Worrellb, & Sigurgeirsdottirc, 2022)

- la seguridad energética, la mayoría de los interesados mencionó una transición energética, principalmente en el transporte, de combustibles fósiles importados a energías renovables nacionales para aumentar la independencia y la seguridad energética.

Tabla A 10

Indicadores para el tema de seguridad energética.

| Tema | Subtema | Indicador | Referencia |
|----------------------|---|---|----------------|
| Seguridad energética | Reservas de energía suficientes | Oferta total de energía primaria | 5,6,9,11,19 |
| | | Relación dinámica reserva/producción | 5,12–15,19–21 |
| | | Superávit crítico | 9 |
| | Diversas fuentes de energía | Índice de diversidad del suministro de energía por tipo | 3,5,7,14–16,21 |
| | Fortalecer el sistema de transmisión y distribución | Inversiones gubernamentales en el desarrollo de infraestructura energética. | 5 |
| | | Eficiencia de la conversión y distribución de energía. | 3,12–15,20 |
| | | Participación subterránea del sistema de transmisión y distribución. | Original |
| | Calidad del suministro: urbano versus rural | Frecuencia de la red eléctrica. | 5 |
| | | Frecuencia y duración de los apagones | 5 |
| | Independencia energética: energía doméstica | Generación nacional total y participación por tipo | 21 |

| Tema | Subtema | Indicador | Referencia |
|-------------|--|---|-------------------|
| | | Proporción de fuentes de energía domésticas en TPES | 3,21,22 |
| | Independencia energética: dependencia de las importaciones | Proporción de energía importada en TPES | 3,9,15,20,21 |
| | Independencia energética: riesgo de las importaciones | Proporción de importaciones procedentes de países políticamente inestables | 5,7, 14 |
| | | Grado de gestión de riesgos en el transporte. | 17 |
| | Transiciones energéticas | Número de puntos de carga rápida y otras estaciones multicombustible ecológicas | 10 |
| | | Proporción de turismos por tipo de combustible | 8 |
| | | Consumo de energía para el transporte por combustible. | 5,8 |
| | | Proporción de combustibles renovables en el combustible total para buques | 10 |
| | | Número de aviones que utilizan carga eléctrica conectada a tierra | 10 |

3. Consejo Mundial de la Energía y Oliver Wyman, 2017 , 5. Sovacool y Mukherjee, 2011 , 6. Shortall et al., 2015 , 7. Asia Pacific Energy Research Centre, 2007 , 8. Eurostat, 2017 , 9. García-Álvarez et al., 2016 , 10. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018 , 11. SDSN, 2014 , 12. Sovacool et al., 2011 , 13. Sovacool, 2013 , 14. Martchamadol y Kumar, 2013 , 15. OIEA et al. , 2005 , 16. Foro Económico Mundial, 2017 , 19. Helio International, 2000 , 20. Yu et al., 2010 , 21. Red Global sobre Energía para el Desarrollo Sostenible et al., 2010

Nota. Fuente: (Gunnarsdottir, Davidsdottir, Worrellb, & Sigurgeirsdottirc, 2022)

4. sistemas de energía eficiente económicamente según las partes interesadas, el lado de la oferta del sistema energético debe ser económico y rentable para ser sostenible y la rentabilidad del suministro de energía podría aumentarse mediante inversiones adecuadas y avances tecnológicos,

Tabla A 11

Indicadores para el tema sistema energético económicamente eficiente.

| Tema | Subtema | Indicador | Referencia |
|--|---|--|-------------------|
| Sistema energético económicamente eficiente | Diversidad en ingresos e industrias. | Índice de diversidad del consumo de energía por sector | 7 |
| | Gasto/ingresos del gobierno | Ingresos del gobierno por ventas de energía | 5 |
| | | Ingresos fiscales del impuesto al carbono y los combustibles fósiles | 5,8-10 |
| | | Gasto gubernamental en subsidios a los combustibles fósiles | 5,11-13 |
| | | Inversiones gubernamentales en desarrollo de infraestructura | 5 |
| | Sistema energético económico y rentable | Inversión en el sector energético | 3 |
| | | Intensidad energética por sector | 3,5,11-19 |
| | | Costo promedio nivelado de la electricidad. | Original |
| | Precios de energía asequibles | Proporción del uso de energía cubierto por contratos a largo plazo | Original |
| | | Proporción de los ingresos de los hogares gastada en energía | 4,5,9,15,19 |
| Volatilidad del precio de la energía por tipo | | 5,12,13 | |

3. Consejo Mundial de la Energía y Oliver Wyman, 2017 , 4. Neves y Leal, 2010 , 5. Sovacool y Mukherjee, 2011 , 7. Asia Pacific Energy Research Centre, 2007 , 8. Eurostat, 2017 , 9. García-Álvarez et al ., 2016 , 10. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018 , 11. SDSN, 2014 , 12. Sovacool et al., 2011 , 13. Sovacool, 2013 , 14. Martchamadol y Kumar, 2013 , 15. OIEA et al. , 2005 , 16. Foro Económico Mundial, 2017 , 17. Murakami et al., 2011 , 18. Global Energy Institute y Cámara de Comercio de EE. UU., 2018 , 19. Helio International, 2000 .

Nota. Fuente: (Gunnarsdottir, Davidsdottir, Worrellb, & Sigurgeirsdottirc, 2022)

5. la producción de energía sustentable donde es necesario reducir las emisiones procedentes de la producción de energía, tanto de dióxido de carbono como de otros contaminantes del aire, y minimizar el área de impacto de las centrales eléctricas;

Tabla A 12
Indicadores para el tema de producción de energía sostenible.

| Tema | Subtema | Indicador | Referencia |
|---|---|---|------------------------------|
| Producción de energía sostenible | | Generación total y participación por tipo | 3,8,16,23,24 |
| | Sistema energético neutro en carbono | Participación de energías renovables en TPES | 4-9,12–14,19,20,22,25–27 |
| | | Cantidad de secuestro de carbono por parte de la industria energética | 1,2 |
| | Utilización sostenible de los recursos. | Relación dinámica reserva/producción | 5,12–14,19–21 |
| | Minimizar los impactos sobre la tierra | Área total de impacto de las centrales eléctricas. | 1 |
| | Minimizar las emisiones | Emisiones netas procedentes de la producción y utilización de energía | |
| | | Para: GEI, NOx, CH4, SO2, H2S y PM2,5 | 2-6,8,9,12–15,18,20,22–24,26 |
| | Per cápita, sobre PIB, por sector o por TPES | | |
| | Concentraciones ambientales de contaminantes del aire en zonas urbanas. | 15 | |

1. Comité directivo, 2016 , 2. Austurbrú, sf , 3. Consejo Mundial de la Energía y Oliver Wyman, 2017 , 4. Neves y Leal, 2010 , 5. Sovacool y Mukherjee, 2011 , 6. Shortall et al., 2015 , 8 Eurostat , 2017 , 9. García-Álvarez et al., 2016 , 12. Sovacool et al., 2011 , 13. Sovacool, 2013 , 14. Martchamadol y Kumar, 2013 , 15. OIEA et al., 2005 , 16. Foro Económico Mundial, 2017 , 18. Instituto de Energía Global y Cámara de Comercio de EE. UU., 2018 , 19. Helio International, 2000 , 20. Yu et al., 2010 , 21. Red Global sobre Energía para el Desarrollo Sostenible et al., 2010 , 22. Iddrisu y Bhattacharyya, 2015 , 23. Agencia Europea de Medio Ambiente, 2014 , 24. Scheepers et al., 2007 , 25. Doukas et al., 2012 , 26. Schlör et al., 2013 , 27. Lee y Zhong, 2015

Nota: Indicadores calculados anualmente.

Nota. Fuente: (Gunnarsdottir, Davidsdottir, Worrellb, & Sigurgeirsdottirc, 2022)

6. y consumo de energía sustentable donde discutieron la necesidad de una mayor conciencia sobre los impactos dañinos de los sistemas energéticos actuales y un cambio de actitud hacia uno más consciente del medio ambiente.

Tabla A 13
Indicadores para el tema de producción de energía sostenible

| Tema | Subtema | Indicador | Referencia |
|--------------------------------------|----------------------------------|--|-------------------|
| Consumo de energía sostenible | Reducir el consumo de energía | Consumo total de energía (primaria o final) | 3,4,9,12– |
| | | Por tipo, per cápita, sobre PIB o por sector | 15,19,20,22,23 |
| | Eficiencia energética | Intensidad energética por sector | 3,5,11–19 |
| | | Relación entre el consumo final y el primario | 19 |
| | | Factor de carga para capacidades eléctricas brutas | 24 |
| | | Edad media de coches y barcos. | 23 |
| | Combustibles fósiles más limpios | Factor de emisión de los combustibles fósiles | 5,19 |
| | Cambio de actitud | Proporción de diferentes formas de transporte elegidas | 1,4 |
| | | Proporción de turismos por tipo de combustible | 8 |
| | | Consumo de energía para el transporte por combustible. | 5,8 |

1. Comité directivo, 2016 , 3. Consejo Mundial de la Energía y Oliver Wyman, 2017 , 4. Neves y Leal, 2010 , 5. Sovacool y Mukherjee, 2011 , 8. Eurostat, 2017 , 9. García-Álvarez et al., 2016 , 11. SDSN, 2014 , 12. Sovacool et al., 2011 , 13. Sovacool, 2013 , 14. Martchamadol y Kumar, 2013 , 15. OIEA et al. 2005 , 16. Foro Económico Mundial, 2017 , 17. Murakami et al., 2011 , 18. Global Energy Institute y Cámara de Comercio de EE. UU., 2018 , 19. Helio International, 2000 , 20. Yu et al., 2010 , 22. Iddrisu y Bhattacharyya, 2015 , 23. Agencia Europea de Medio Ambiente, 2014 , 24. Scheepers et al., 2007 .

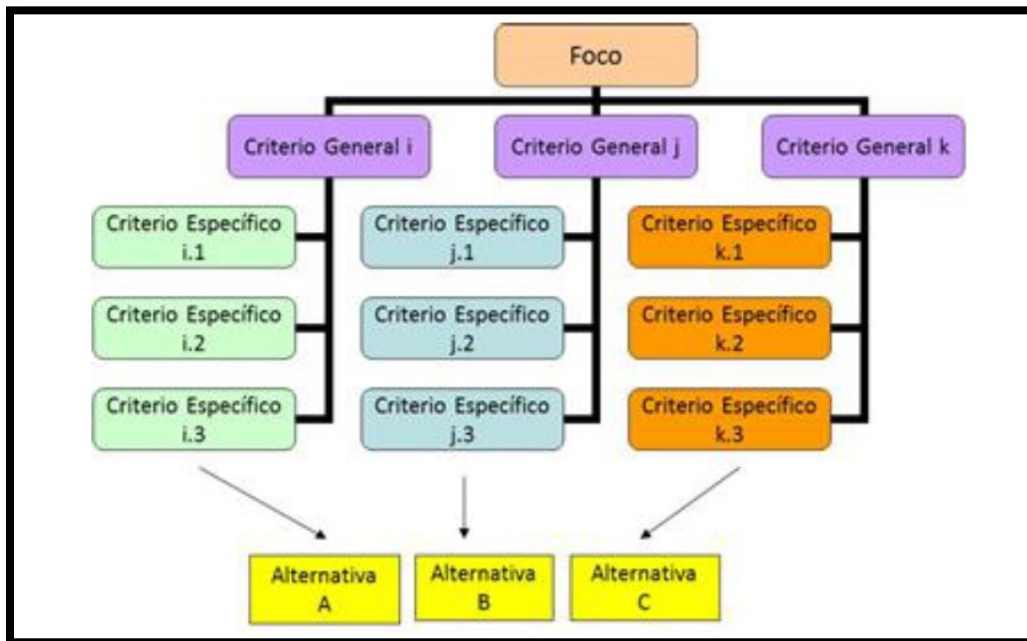
Nota. Fuente: (Gunnarsdottir, Davidsdottir, Worrellb, & Sigurgeirsdottirc, 2022)

Anexo 6. Proceso de Análisis Jerárquico

El Proceso de Análisis Jerárquico fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty en 1980 y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo Jerárquico. El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un modelo que básicamente contiene o se puede descomponer en tres/cuatro niveles (Figura A 1):

1. Meta u objetivo: es el foco, es el objetivo amplio y global. Es lo que se espera resolver.
2. Criterios generales: son los elementos o dimensiones que definen el objetivo principal.
3. Criterios específicos: son los elementos que definen el criterio debajo del cual ellos se encuentran. Deben ser cuantificables.
4. Alternativas: son las diferentes soluciones o cursos de acción.

Figura A 1
Ejemplo de jerarquización de AHP



Nota: Fuente: (Tubet Abramo, 2016)

Una vez construido el Modelo Jerárquico, se realizan comparaciones por pares entre dichos elementos y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas. El fundamento del proceso de Saaty descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende.

Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por el mismo Saaty, que va desde 1 hasta 9.

Figura A 2
Escala de Saaty

| Escala numérica | Escala verbal | Explicación |
|------------------|--|---|
| 1 | Igual importancia | Dos actividades contribuyen por igual al objetivo |
| 3 | Importancia moderada de un elemento sobre otro | La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre otro |
| 5 | Importancia fuerte de un elemento sobre otro | Un elemento es muy fuertemente favorecido |
| 7 | Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro | Un elemento es muy dominante |
| 9 | Extrema importancia de un elemento sobre otro | Un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermedios entre dos juicios adyacentes | Se usan como compromiso entre dos juicios |
| Incrementos 0, 1 | Valores intermedios de incrementos | Utilización para graduación más fina de juicios |

Nota, Fuente: (Tubet Abramo, 2016)

Anexo 7. Indicadores energéticos para el desarrollo sustentable de acuerdo con la OIEA et al., del 2005.

Tabla A.
Indicadores energéticos para el desarrollo sustentable de acuerdo con la IEAA et al.

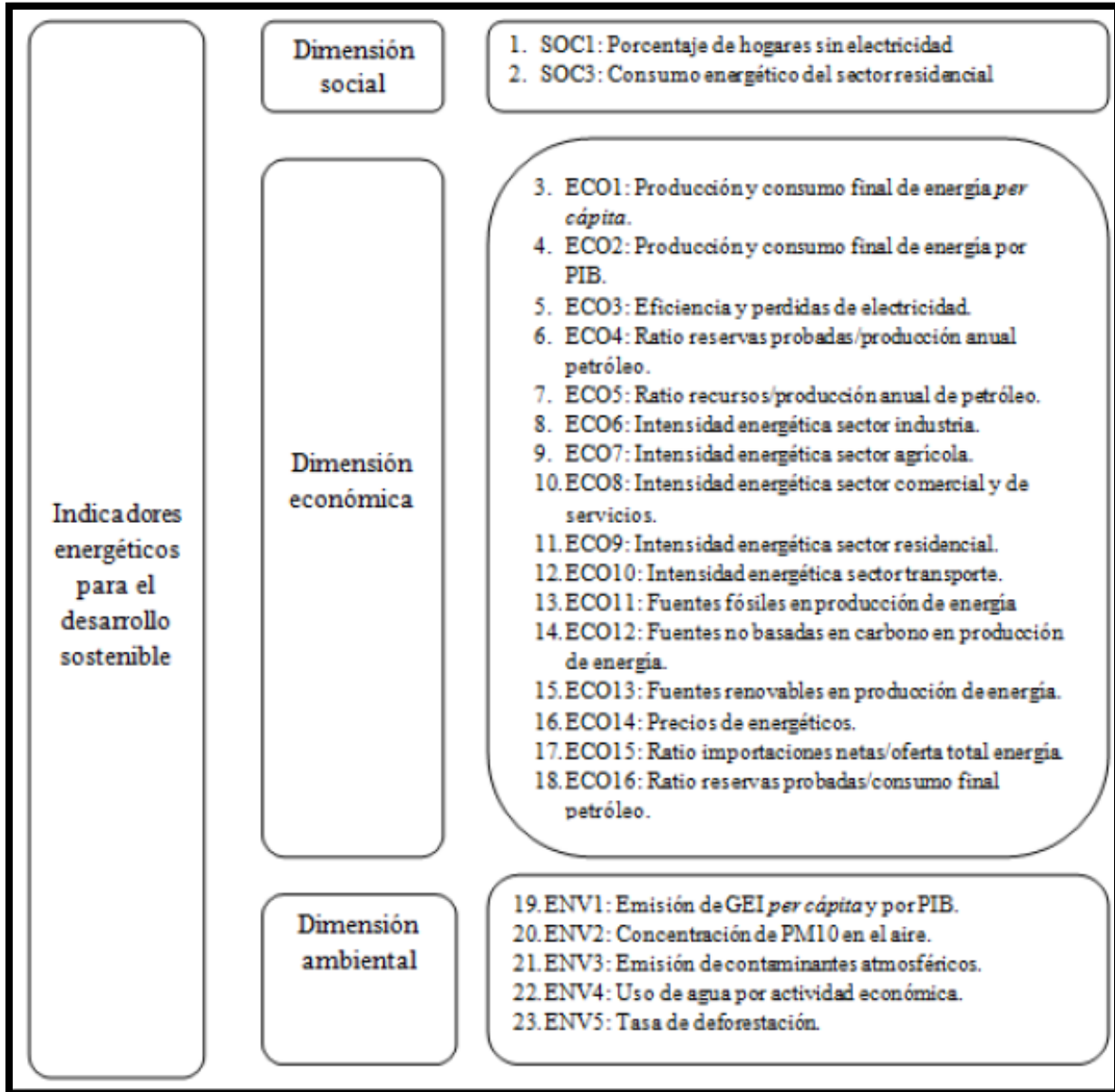
| <i>Tema</i> | <i>Sub tema</i> | <i>Indicador</i> |
|-------------------------------------|--|---|
| <i>Equidad</i> | <i>Accesibilidad</i> | <i>Porcentaje de la población sin electricidad o acceso a energía comercial</i> |
| | <i>Comodidad</i> | <i>Porcentaje del ingreso destinado a combustibles y electricidad</i> |
| | <i>Disparidad</i> | <i>Uso de energía residencial por cada nivel de ingreso y combustible</i> |
| <i>Salud</i> | <i>Seguridad</i> | <i>Accidentes fatales en la cadena energética</i> |
| <i>Patrones de producción y uso</i> | <i>Uso global</i> | <i>Energía per cápita</i> |
| | <i>Productividad global</i> | <i>Energía por unidad de Producto Interno Bruto</i> |
| | <i>Eficiencia en el suministro</i> | <i>Eficiencia en la conversión y distribución</i> |
| | <i>Producción</i> | <i>Razón reservas/producción</i> |
| | | <i>Razón recursos/producción</i> |
| | <i>Usos finales</i> | <i>Intensidad energética de los diversos sectores de uso final (industrial transporte, residencial, agropecuario, etc.)</i> |
| <i>Diversificación</i> | <i>Porcentaje de las diversas fuentes primarias de energía en el consumo</i> | |
| | <i>Porcentaje de las fuentes que no son de origen fósil</i> | |
| | <i>Porcentaje de las fuentes renovables de energía</i> | |
| | <i>Precios</i> | |
| <i>Seguridad</i> | <i>Importaciones</i> | <i>Energía neta importada</i> |
| | <i>Reservas</i> | <i>Reservas de las diferentes fuentes de energía vs. consumo</i> |
| <i>Atmósfera</i> | <i>Cambio climático</i> | <i>Emisiones de CO₂ totales, per cápita y por PIB</i> |
| | <i>Calidad del aire</i> | <i>Concentración de contaminantes en la atmósfera de zonas urbanas</i> |
| | | <i>Contaminantes atmosféricos debidos a los sistemas energéticos</i> |
| <i>Agua</i> | <i>Calidad del agua</i> | <i>Descargas de los sistemas energéticos</i> |
| <i>Suelo</i> | <i>Calidad de suelo</i> | <i>Área en donde la acidificación está por encima de la capacidad de carga</i> |
| | <i>Bosques</i> | <i>Deforestación asociada a uso de la energía</i> |
| | <i>Generación y manejo de residuos sólidos</i> | <i>Tasa de generación de residuos sólidos a energía producida</i> |
| | | <i>Porcentaje de disposición adecuada de residuos sólidos respecto al total de residuos</i> |
| | | <i>Tasa de generación de residuos radioactivos respecto a energía generada</i> |

Fuente: (IEAA, UNDESA, IEA, Eurostat, EEA, 2005).

Anexo 8. Indicadores IEDS e Índice de Sostenibilidad Energética (ISE) para Guatemala

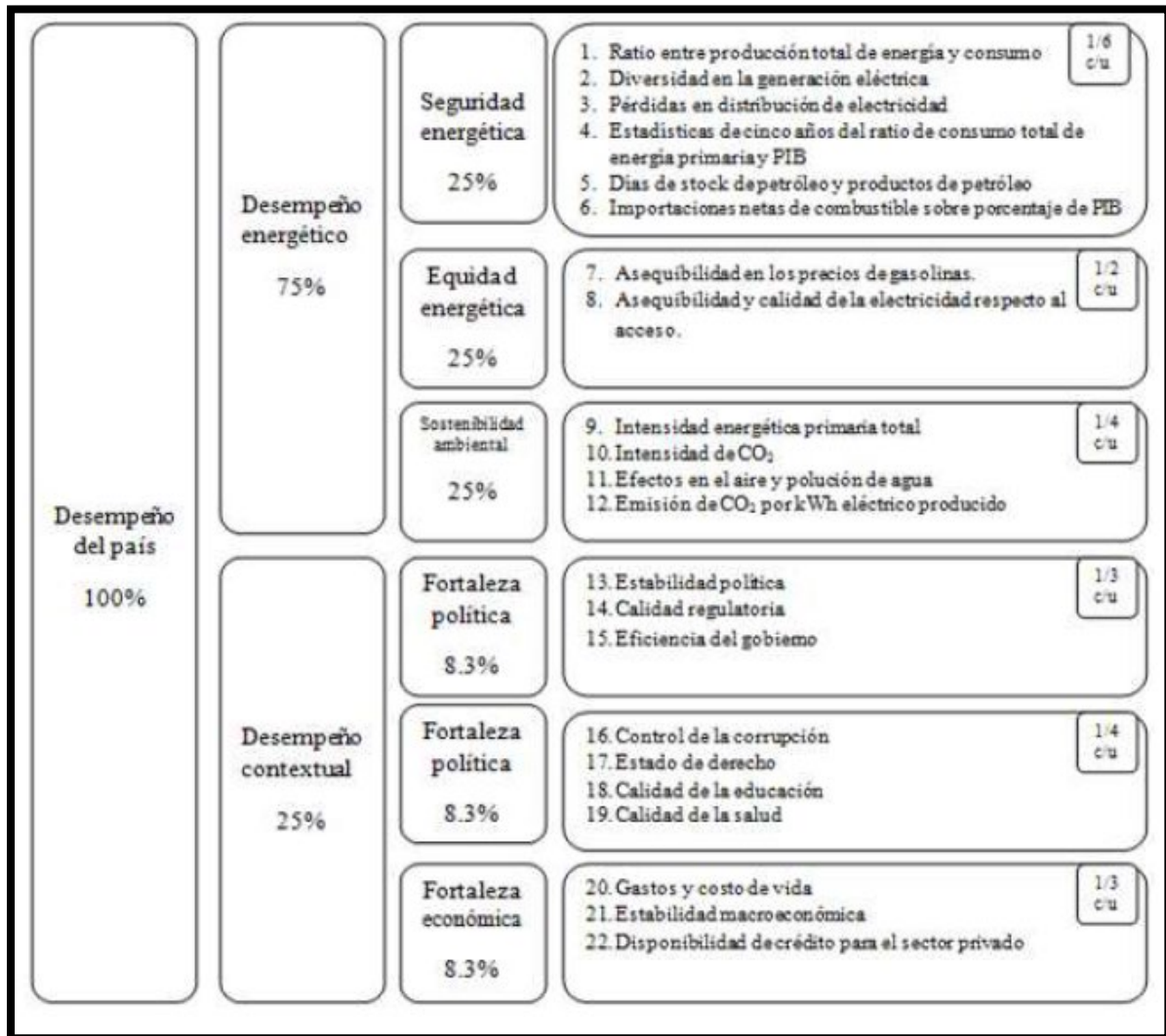
Figura A 3

Indicadores seleccionados de los IEDS para Guatemala



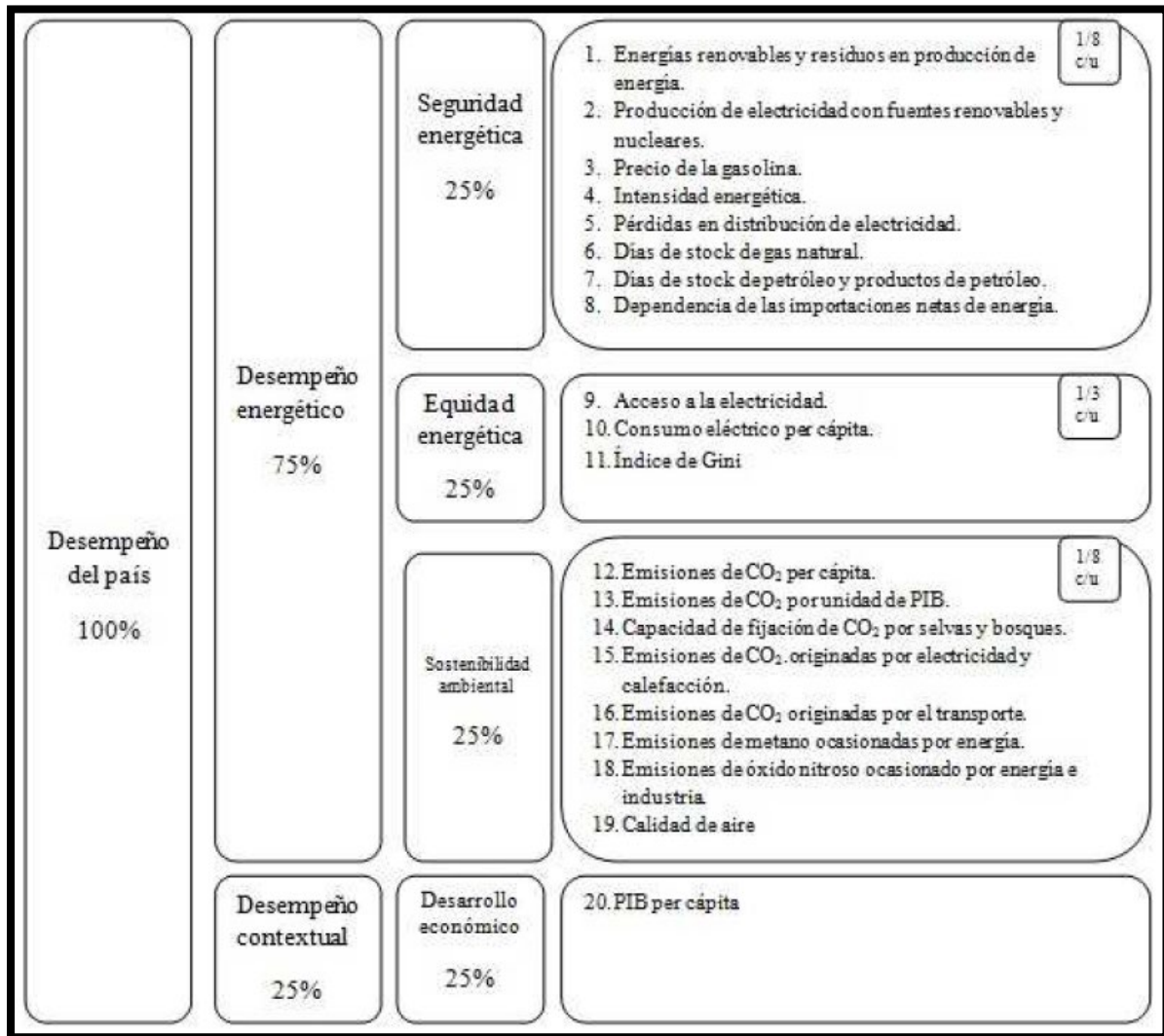
Nota. Fuente: (Melendez Mendizabal, 2014)

Figura A 4
Índice de Sustentabilidad Energética del Consejo Mundial de Energía



Nota. Fuente: (Melendez Mendizabal, 2014)

Figura A 5
Indicadores del ISE seleccionados para Guatemala



Nota. Fuente: (Melendez Mendizabal, 2014)

Anexo 9. Indicadores de sostenibilidad en la generación de energía en zonas aisladas en la Amazonía, en el estado de Rondônia, Brasil.

*Tabla A 14
Indicadores ambientales en zonas aisladas en la Amazonía*

| Sigla | Variables | Descripción | Objetivo | Unidad | Referencia |
|--------------|------------------------------|--|--|-----------------|---------------------|
| IA1 | Emisiones de CO ₂ | Estimación de emisiones de CO ₂ que tienen en cuenta el consumo de diésel | Evaluar la contribución de la empresa a las emisiones de GEI (CO ₂). | Tonelada /kWh | 4 g/kWh |
| IA2 | Emisiones de CH ₄ | Estimación de emisiones de CH ₄ que tienen en cuenta el consumo de diésel | Evaluar la contribución de la empresa a las emisiones de GEI (CH ₄). | Tonelada /kWh | 4 g/kWh |
| IA3 | Emisiones de NO _x | Estimación de emisiones de NO _x que tienen en cuenta el consumo de diésel | Evaluar la contribución de la empresa a las emisiones de GEI (NO _x). | Tonelada /kWh | 4 g/kWh |
| IA4 | Emisiones de SO ₂ | Estimación de emisiones de SO ₂ que tienen en cuenta el consumo de diésel | Evaluar la contribución de la empresa a las emisiones de GEI (SO ₂). | Tonelada /kWh | 4 g/kWh |
| IA5 | Inversión socioambiental | Inversión en acciones socioambientales | Evaluar la inversión del concesionario para acciones socioambientales. | Real / Conexión | R\$300,00 /Conexión |
| IA6 | Impacto de recuperación | Impacto de las acciones del plan recuperación. | Evaluar la implementación del plan de recuperación de la empresa. | Unidades | CF |
| IA7 | Plan de acción | Impacto del plan de acción. | Evaluar la ejecución del plan de acción de la empresa. | Unidades | CF |

| Sigla | Variables | Descripción | Objetivo | Unidad | Referencia |
|--------------|-----------------------|---|---|---------------|-------------------|
| IA8 | Mitigación de riesgos | Impacto de las acciones del plan de mitigación de riesgos | Evaluar la ejecución del plan de mitigación de riesgos de la empresa. | Unidades | CF |
| IA9 | Resiliencia | Impacto de las acciones del plan de resiliencia. | Evaluar la ejecución del plan de resiliencia de la empresa. | Unidades | CF |
| IA10 | Impacto de monitoreo | Impacto de las actividades de seguimiento del plan de acción. | Evaluar el seguimiento del plan de acción de la empresa. | Unidades | CF |

CF – Constitución Federal del Brasil (art. 225, §1º, inciso IV).

Nota. Fuente: (Torres do Amaral, De Souza, & Carvalho, 2021)

Tabla A 15
Indicadores sociales en zonas aisladas en la Amazonía

| Sigla | Variables | Descripción | Objetivo | Unidad | Referencia |
|--------------|--|--|---|-------------------------|----------------------------------|
| IS1 | Establecimientos de salud en la SUS | Unidades de servicios públicos del municipio por número de conexiones. | Evaluar el alcance de la empresa para atender unidades de salud pública. | Unidad / Conexiones | 1 /30.000 habitantes |
| IS2 | Índice de malaria | Porcentaje de pruebas positivas de malaria realizadas en el municipio por número de llamadas. | Evaluar el índice de malaria en el área cubierta por el proyecto. | Porcentaje / Conexiones | < 90% de 6.734 casos en Rondônia |
| IS3 | Mortalidad infantil | Porcentaje de mortalidad infantil con relación a los nacidos vivos en el municipio por número de conexiones. | Evaluar la tasa de mortalidad infantil en el área cubierta por el proyecto. | Porcentaje / Conexiones | 10/1.000 nacidos |
| IS4 | Establecimientos educación fundamental | Unidades de educación primaria en el municipio por número de conexiones. | Evaluar el alcance de la empresa para atender | Unidad / Conexiones | 100% |

| Sigla | Variables | Descripción | Objetivo | Unidad | Referencia |
|--------------|--------------------------------------|--|--|---------------------|-------------------|
| | | | unidades de educación pública primaria | | |
| IS5 | Estudiantes de enseñanza fundamental | Estudiantes en la escuela primaria en el municipio por número de conexiones. | Evaluar el alcance de la empresa para la expansión de la educación primaria. | Unidad / Conexiones | 95% |
| IS6 | Estudiantes de escuela secundaria | Estudiantes en la escuela secundaria en el municipio por número de conexiones. | Evaluar el alcance del proyecto en la ampliación de la educación secundaria. | Unidad / Conexiones | 85% |
| IS7 | Adultos sin educación | Adultos que no completaron la educación primaria en el municipio por número de conexiones. | Evaluar el alcance del emprendimiento para reducir el analfabetismo. | Unidad / Conexiones | 93,5% |
| IS8 | Población indígena del municipio | Población indígena del municipio por número de conexiones. | Evaluar el alcance del proyecto para cubrir a la población indígena. | Unidad / Conexiones | 100% |

SUS – Sistema único de salud en Brasil

Nota. Fuente: (Torres do Amaral, De Souza, & Carvalho, 2021)

Tabla A 16
Indicadores económicos en zonas aisladas en la Amazonía

| Sigla | Variables | Descripción | Objetivo | Unidad | Referencia |
|--------------|------------------|---|---|---------------------|-------------------|
| IE1 | Inversión | Inversión requerida para la implementación de la microrred. | Evaluar el alcance financiero de la inversión. | Real | R\$ 10.000,00 |
| IE2 | Empleos formales | Puestos de trabajo en el municipio donde existe la microrred. | Evaluar el impacto de la empresa en la creación de empleo | Unidad / Conexiones | 500 |

| Sigla | Variables | Descripción | Objetivo | Unidad | Referencia |
|--------------|------------------------|---|--|-------------------------------|-------------------|
| IE3 | Ingreso per cápita | Ingreso per cápita en el municipio atendido por microrred. | Evaluar los ingresos locales donde se realizó la inversión. | Real / Habitante / Conexiones | R\$ 50,00 |
| IE4 | Conexiones eléctricas | Conexiones eléctricas en residencias. | Evaluar la contribución de la empresa al acceso universal a la electricidad. | Unidad / Habitantes | 25% |
| IE5 | Costo de la tecnología | Costo de la tecnología para la implementación de la microrred. | Evaluar el impacto de la empresa en el costo de la tecnología. | Real / MWh | R\$ 34,00/ MWh |
| IE6 | Costo de electricidad | Costo de la electricidad suministrada a la población. | Evaluar el costo del servicio prestado en el lugar. | Real / MWh | R\$ 34,00/ MWh |
| IE7 | Costo de impacto | Relación directa entre inversión y número de conexiones atendidas | Evaluar el tamaño de la inversión con relación a la electrificación del municipio. | Real / MWh | R\$ 34,00/ MWh |

Nota. Fuente: (Torres do Amaral, De Souza, & Carvalho, 2021)

Anexo 10. Revisión y cálculo de los indicadores de un sistema fotovoltaico residencial en Italia

En la revisión bibliográfica los autores del artículo (A combined assessment of the energy, economic and environmental performance of a photovoltaic system in the Italian context, 2023) identificaron y clasificaron los indicadores que posteriormente seleccionaron para realizar la evaluación de viabilidad del sistema PV estudiado. En la siguiente tabla se encuentra la clasificación realizada:

Tabla A 17

Clasificación de la muestra de revisión, basada en la clasificación de los indicadores considerados en cada artículo incluido

| Autor | Revista/libro, año | Indicadores |
|--|---|--|
| <i>Indicadores medioambientales y energéticos</i> | | |
| Hsu y cols. | Revista de Ecología Industrial, 2012 | CO ₂ eq/kWh |
| de Wild-Scholten | Materiales de Energía Solar y Células Solares, 2013 | CO ₂ eq/kWh EPBT |
| Asdrúbal y cols. | Revisiones de Energía Renovable y Sostenible, 2015 | CO ₂ eq/kWh, EPBT, Demanda Acumulada de Energía |
| Raugei y Leccisi | Política energética, 2016 | EROI, Demanda Acumulada de Energía |
| Fthenakis y Raugei | El rendimiento de los sistemas fotovoltaicos (FV). Elsevier, 2017 | CO ₂ eq/kWh EROI, EPBT |
| Gazbour et al. | Revista de Producción Más Limpia, 2018 | CO ₂ eq/kWh |
| Liu y Van den Bergh | Política Energética, 2020 | CO ₂ eq/kWh EROI, Retorno de la energía sobre el carbono invertido, EPBT |
| <i>Indicadores económicos y financieros</i> | | |
| Branker y cols. | Revisiones de Energía Renovable y Sostenible, 2011 | LCOE |
| Ueckerdt y cols. | Energía, 2013 | LCOE |
| Hernández-Moro y cols. | Revisiones de Energía Renovable y Sostenible, 2013 | LCOE |
| Ameli y Kammen | Energía para el Desarrollo Sostenible, 2014 | LCOE |

| Autor | Revista/libro, año | Indicadores |
|----------------------------|---|---|
| Antonelli y Desideri | Energía Aplicada, 2014 | Tasa Interna de Retorno, PBP |
| Ouyang y Lin | Política Energética, 2014 | LCOE |
| Ye et al. | Energía Aplicada, 2017 | VAN: Tasa Interna de Retorno |
| Zhang y cols. | Conversión y Gestión de la Energía, 2017 | PBP |
| Said et al. | Evaluación de Tecnologías Energéticas Sostenibles, 2015 | LCOE |
| Edalati y cols. | Energía, 2016 | LCOE, VAN, PBP, Tasa Interna de Retorno |
| Tao y Finenko | Política Energética, 2016 | LCOE, VAN, Tasa Interna de Retorno, PBP |
| Ambos tipos de indicadores | | |
| Pillai y Naser | Evaluación de Tecnologías de Energía Sostenible, 2018 | EPBT, LCOE, NPV, PBP |
| Hadi y Heidari | Revista de Producción Más Limpia, 2021 | Demanda Acumulada de Energía, CO ₂ eq/kWh, EPBT, LCOE, Tasa Interna de Retorno |

Nota. Fuente: (Paiano, Lagioia, & Ingraio, 2023)

Los indicadores energéticos y ambientales que fueron tenidos en cuenta por los autores para el desarrollo de este estudio EPBT, EROI, y EIMP. Para el cálculo de estos indicadores los autores tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- los datos materiales utilizados para construir este estudio de caso; el silicio cristalino (c-Si) representaba el 94 % de la capacidad fotovoltaica instalada acumulada en Italia,
- los índices de eficiencia a nivel de la instalación fotovoltaica y de la red a la que está conectada la instalación fotovoltaica de que se trate. La eficiencia de la red es la eficiencia (η_G) de la conversión de electricidad en el lado de la demanda, es decir, el insumo de energía eléctrica que se convierte en necesidades de energía primaria utilizando un factor de eficiencia que generalmente se supone sobre la base de la bibliografía. En este estudio de caso, los autores utilizaron un valor de 0,38, para la combinación de red y electricidad italiana.
- la relación de rendimiento (PR); según la AIE, se define en la norma IEC 61724 como "la relación entre el rendimiento final del sistema (generación real de CA) y el rendimiento de

referencia o ideal (rendimiento nominal de CC) y se utiliza ampliamente como métrica de rendimiento para cuantificar las pérdidas generales del sistema debido a los efectos de la temperatura, la suciedad, el sombreado y la ineficiencia de sus componentes. Para el desarrollo de su evaluación, los autores asumieron que la PR es igual a 0,77 basados en un estudio y es razonable para el contexto del estudio.

- La eficiencia fotovoltaica (η_{PV}) puede describirse como el porcentaje de la energía solar que se convierte en electricidad por un sistema fotovoltaico determinado. teniendo en cuenta las participaciones italianas de las dos tecnologías c-Si, como se mencionó anteriormente en este artículo, este equipo de autores seleccionó un promedio ponderado del 17 % de eficiencia.

Para el cálculo del indicador de los indicadores se requieren conocer otros parámetros que se describen a continuación:

La Estimación de la producción de energía $E_{OUT(EL)}$, es la producción de electricidad asociada a toda la vida útil de la planta fotovoltaica instalada, expresada en MJ por unidad de metro cuadrado fotovoltaico, los autores emplearon el método basado en la Ecuación 1.

$$E_{OUT(EL)} = I_{rr} \times \eta_{PV} \times PR \times 3.6 \times \sum_{t=0}^{n-1} (1 - DR)^t$$

Donde la irradiación solar (IRR), la eficiencia fotovoltaica (η_{PV}), relación de rendimiento PR, y la respectivamente y disminución del rendimiento (DR) tomaron los parámetros 1928 (kWh/m²/y), 17%, 0.77 y 1% respectivamente

A continuación, $E_{OUT(EL)}$, se promedió a lo largo de los 25 años de vida útil de la planta fotovoltaica, calculando así el $E_{AOUT(EL)}$, es decir, la producción media anual de la planta fotovoltaica.

Por último, $E_{OUT(EL)}$, valor calculado anteriormente, se convirtió en unidades de energía primaria equivalente utilizando la eficiencia de la red antes mencionada de 0,38, mediante la aplicación de la Ecuación 2.

$$E_{OUT} = E_{OUT(EL)} \div \eta_G$$

La energía incorporada (E_{in}) representa la inversión total en energía (en términos de energía primaria) en la vida útil de un sistema fotovoltaico, y puede evaluarse mediante la aplicación del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). De acuerdo con las directrices de la AIE, E_{in} debe calcularse, de acuerdo con la Ecuación 3, como la suma de las siguientes contribuciones energéticas:

- preparación de insumos de material y energía (E_{Yo});
- fabricación de los componentes de la planta fotovoltaica (E_m), incluidos módulos, inversores, cables y cableados, etc.;
- instalación de la planta fotovoltaica (E_C);
- operación y mantenimiento (E_{Om}); y
- gestión del final de la vida útil (E_{eol}).

$$E_{in} = E_{Yo} + E_m + E_C + E_{Om} + E_{eol}$$

Para las emisiones de GEI tuvieron en cuenta la literatura y para el caso de estudio calcularon el valor medio ponderado, que resultó igual a 202,28 kg de CO₂eq por metro cuadrado de la planta fotovoltaica, y 3488 kg de CO₂eq para el conjunto.

El γ_G , es el impacto de la red eléctrica en el cambio climático por el lado de la demanda. Esto está representado por el indicador de "intensidad de carbono" (IC), que se conoce como los gramos de dióxido de carbono (CO₂ eq) que se toman para hacer una unidad de electricidad. los autores consideraron el IC de la electricidad para el contexto italiano utilizando el valor promedio de 0,2763 kg de CO₂eq/kWh.

La electricidad producida por la planta fotovoltaica investigada a lo largo de sus 25 años de vida útil y vertida a la red, considerando una reducción anual de la DR y el rendimiento del 1 %, equivale a 96.648 kWh.

El tiempo de recuperación de la energía EPBT se puede definir como el período que requiere un sistema de energía renovable para generar la cantidad equivalente de energía que se gasta en su ciclo de vida. Por lo tanto, se expresa en años, y se calculó según la Ecuación 4.

$$EPBT = (E_{in} \div E_{AOUT(EL)}) \div \eta_G$$

El Retorno de la Energía sobre la Inversión (EROI) es una relación que describe una medida de la energía producida en relación con la energía utilizada para crearla. La importancia del EROI se da por los siguientes aspectos clave: es la cantidad de energía gastada para producir una cierta cantidad de energía neta; es un determinante importante en la fijación de precios de los productos básicos energéticos y de la electricidad; y disminuye cuando la energía se vuelve más escasa y difícil de extraer o producir.

Para la energía solar se relaciona cuánta más energía es capaz de generar un panel solar en su vida útil en comparación con la que se consume para crearla y desecharla en una perspectiva de ciclo de vida y se calcula el EROI_{EL} con la ecuación 5

$$EROI_{EL} = E_{OUT(EL)} \div E_{in}$$

La EROI_{PE-eq} se calcula a partir del EROI_{EL} mediante la aplicación de un factor de corrección igual al valor inverso de la eficacia de la red (η_G), como se muestra en la Ecuación 5.

$$EROI_{PE-eq} = EROI_{EL} \times (1/\eta_G)$$

El indicador de Potencial de Mitigación del Impacto Ambiental (EIMP), se expresa en kg de CO₂ eq, y tiene en cuenta los potenciales de mitigación del Impacto del Cambio Climático (ICC) cuantificados a lo largo de la vida. en el caso de las plantas de energía renovable como la fotovoltaica evaluada en este estudio, la cantidad de electricidad generada por la planta fotovoltaica a lo largo de su vida útil conduce a una ICC evitada, que se compara con el impacto causado por el ciclo de vida de la planta fotovoltaica, que involucra su suministro de materiales, fabricación, instalación, operación, mantenimiento y gestión del final de su vida útil.

El EIMP relacionado con el CC (EIMP_{CC}) se calculó en este trabajo de acuerdo con la Ecuación 7

$$EIMP_{CC} = (\gamma_G \times E_{OUT}) - CC_{in}$$

Dónde:

- E_{out} (kWh) es la generación de electricidad a lo largo de la vida útil de la instalación fotovoltaica considerada;
- γ_G , (kg CO₂eq/kWh) es el impacto de la electricidad de la red en el lado de la demanda en el cambio climático;
- CC_{in} (kg CO₂eq) representa el impacto causado por el ciclo de vida del sistema fotovoltaico.

Para la segunda parte del trabajo relacionada con la contabilidad de las cuestiones económicas y financieras, los autores utilizaron datos sobre la producción de electricidad fotovoltaica. A efectos de cálculo, los autores asumieron un 30 %1 tasa de autoconsumo inmediato de energía (1305 kWh) de la producción anual total (4350 kWh) con sistema fotovoltaico hipotetizado. El excedente producido, equivalente a 3045 kWh/año, se inyectará a la red eléctrica nacional, ya que la inversión se planifica eligiendo la medición neta

Con respecto a los costes fijos incurridos durante la vida útil de la planta fotovoltaica, pueden dividirse en las dos categorías siguientes: el seguro; y el servicio de medición neta que se pagará al Operador de Servicios Energéticos (GSE).

Las salidas también están vinculadas a los costes de mantenimiento de la planta fotovoltaica. En general, la operación principal consiste en limpiar los módulos fotovoltaicos para eliminar el polvo y la suciedad de la superficie, que pueden causar una disminución en el poder de captura de radiación solar de esos módulos y, por lo tanto, en su rendimiento de producción de energía a lo largo del tiempo. La literatura ha documentado que el costo promedio estimado es muy pequeño, y generalmente oscila entre el 1 y el 1,5 % del costo inicial del sistema (Mercanti, 2020).

A efectos de una evaluación prudente, se consideraron costes extraordinarios a tanto alzado en caso de daños no cubiertos por la garantía, que se estimaron en alrededor del 10 % de la inversión inicial.

En particular, se hace referencia al mantenimiento extraordinario programado para aproximadamente la mitad de la vida útil del sistema (en el 13° año).

En la siguiente tabla se resumen los costos asociados al ciclo de vida de la planta fotovoltaica.

Tabla A 18

Resumen de todos los costes asociados al ciclo de vida de la planta fotovoltaica.

| Elemento de costo | Valor (€) | |
|--|--|------|
| Inversión inicial (precio llave en mano de la planta fotovoltaica) | 6500 | |
| Seguro | 50 | |
| Pago de GSE | 0 | |
| Operación y Mantenimiento (O&M) | Costo de mantenimiento anual | 80 |
| | Reemplazos de inversores ^{un} | 1680 |
| | Mantenimiento extra en el 13° año | 650 |

^{un}

Uno cada diez años, del coste medio de 840 € (AS SOLAR, 2021), lo que significa que se contabilizaron dos sustituciones en la vida útil de la planta fotovoltaica investigada.

Nota. Fuente: (Paiano, Lagioia, & Ingraio, 2023)

En la siguiente tabla se resumen los ingresos asociados al ciclo de vida de la planta FV

Tabla A 19

Resumen de todos los ingresos asociados al ciclo de vida de la planta fotovoltaica.

| Partida de ingresos | Valor (€) |
|---|------------------|
| Deducción fiscal anual ^{un} | 325 |
| Medición neta | 268 |
| Excedente de producción de electricidad | 86 |
| Ahorro en la factura de la luz | 237 |

^{un}

Durante los primeros diez años de funcionamiento de la planta.

Nota. Fuente: (Paiano, Lagioia, & Ingraio, 2023)

Con los datos anteriores los autores evaluaron los indicadores VAN, PBP y LCOE.

El valor actual neto (VAN) se considera como la diferencia entre el valor actual de todos los flujos de efectivo netos (F_1, \dots, F_n) y el coste de capital inicial (I_0) asociado a un proyecto de inversión, y generalmente se calcula a través de la Ecuación 8.

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

Dónde

- I_0 es el desembolso de capital inicial o la inversión en el momento 0 (€ 6500,00, como ya se indica en la Tabla X);

- F_t es el flujo de caja esperado en el periodo t , con t yendo de 1 a n , tanto si se trata de un elemento positivo como negativo de la renta;

- n es el número de períodos considerados, correspondientes a 25 años en este estudio de caso;

- r es la tasa de descuento fija (Khatib, 2016), correspondiente a la tasa de descuento identificada para inversiones de igual riesgo. Sobre la base de la bibliografía, se asumió que era del 3 %.

El Período de Recuperación de la Inversión (PBP) tiene una gran importancia en el proceso de evaluación de la conveniencia económica real de cualquier inversión prediseñada. El indicador PBP es representativo del tiempo que tarda en recuperarse un coste de inversión, y se define por el año en el que los flujos de caja acumulados se convierten en un valor positivo. En este estudio se estimó mediante la aplicación de la Ecuación 9:

$$\sum_{t=1}^n F_t = -I_0$$

El año de referencia, aquel en el que la inversión inicial puede considerarse totalmente amortizada, corresponde al primer período en el que se observa una inversión del signo (de - a +) en el valor acumulado del saldo anual. Para el cálculo en profundidad del tiempo de retorno desde el flujo de salida inicial, los autores utilizaron la Ecuación 10, donde:

- A es el valor de referencia progresivo del último año, en el que el saldo acumulado fue negativo;
- B, el último saldo acumulado negativo; y

•C el valor del saldo anual de flujos de efectivo en el primer año en el que el saldo acumulado permite el reembolso total de la inversión inicial (Allouhi et al., 2016).

$$PBP = A + \frac{|B|}{C}$$

El indicador de Costo Nivelado de Energía (LCOE) representa el coste unitario por kWh de la energía generada por un sistema fotovoltaico), a menudo se considera un indicador útil para integrar la metodología de Análisis del Coste del Ciclo de Vida (ACV) para evaluar el rendimiento económico de un sistema fotovoltaico. Los autores utilizaron los datos reportados en las secciones anteriores, para el cálculo de los costos de la producción de electricidad del sistema fotovoltaico considerado, en la forma que se ha descrito a continuación del texto.

El LCOE es la relación entre la suma de los costos totales descontados incurridos durante toda la vida útil del sistema y las unidades de energía descontada producidas durante el mismo período (AIE y NEA, 2010; IRENA, 2015). La Ecuación 11 se utilizó, por lo tanto, para el cálculo del LCOE:

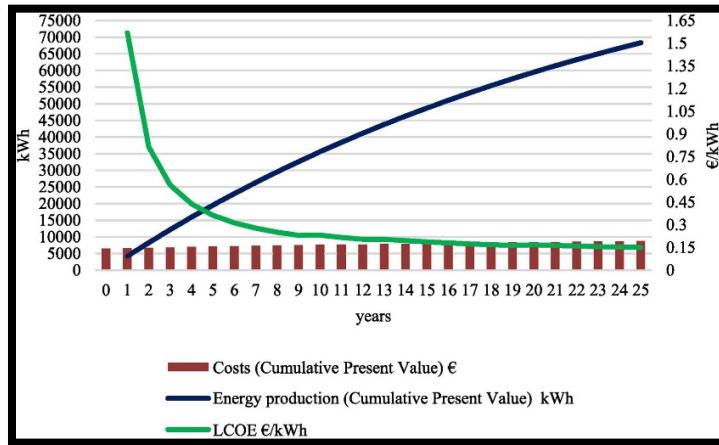
$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n [C_t \times (1 + r)^{-t}]}{\sum_{t=1}^n P \times (1 + r)^{-t}}$$

Dónde:

-C_t representa los costes totales estimados para cada t-año de vida útil de la planta fotovoltaica; y
-P_t es el total de energía fotovoltaica que genera la planta por cada año t.

En las siguientes figuras se muestran los cálculos realizados para los indicadores con los valores seleccionados para realizar la evaluación.

Figura A 6
Cálculo del indicador LCOE



Nota. Fuente: (Paiano, Lagioia, & Ingraio, 2023)

Figura A 7
Cálculo de los indicadores EPBT, EROI, EIMP, VAN y PBP del caso del estudio

$$E_{A_{outEL}} = \{ [1928 \text{ (kWh/m}^2\text{/y)} \times 3.6 \text{ (MJ/kWh)}] \times 0.17 \times 0.77 \times 22.2 \} / 25 = 807 \text{ (MJ/m}^2\text{/y)} \text{ (224 kWh/m}^2\text{/y)}$$

$$EPBT = 2860 \text{ (MJ/m}^2\text{)} / [807 \text{ (MJ/m}^2\text{/y)} / 0.38] = 1.35 \text{ years}$$

$$E_{outEL} = [1928 \text{ (kWh/m}^2\text{/y)} \times 3.6 \text{ (MJ/kWh)}] \times 0.17 \times 0.77 \times 22.2 = 20170 \text{ (MJ/m}^2\text{)} \text{ (6309 kWh/m}^2\text{)}$$

$$EROI_{EL} = 20170 \text{ (MJ/m}^2\text{)} / 2860 \text{ (MJ/m}^2\text{)} = 7.05$$

$$EROI_{PEeq} = 7.05 / 0.38 = 18.55$$

$$EIMP_{cc} = [96648 \text{ (kWh)} \times 0.2763 \text{ (kg CO}_2\text{ eq/kWh)}] - 3488 \text{ (kg CO}_2\text{ eq)} = 23215 \text{ (kg CO}_2\text{ eq)}$$

$$NPV = -10297 + 13178 = \text{€ } 2881$$

$$PBP = 8 + \frac{|-210|}{788} = 8.26 \text{ years}$$

Nota. Fuente: (Paiano, Lagioia, & Ingraio, 2023)

Los autores concluyeron que, en todo el mundo, la energía fotovoltaica tiene el mejor rendimiento económico en las localidades de latitudes medias altas, mientras que la CSP en las zonas áridas de latitudes bajas.

Destacaron que los valores del LCOE y la producción de energía se ven afectados por factores como las características de ubicación del sistema FV, el costo de los insumos, la tecnología empleada por esto muchos autores de la revisión bibliográfica destacaron la necesidad de probar el LCOE a través de un análisis de sensibilidad o han propuesto mejoras a esta herramienta, debido a los aspectos anteriores y las tres regiones de mayor producción de sistemas fotovoltaicos son la Unión Europea (UE), China y Estados Unidos (EE. UU). Los indicadores EROI, EPBT y huella de carbono son útiles para evaluar y mejorar los sistemas fotovoltaicos desde una perspectiva de vida útil del sistema.

Anexo 11. Comparación de los materiales de las células fotovoltaicas comerciales

En la tabla se presenta la comparación realizada en el estudio (Ogbomo, Amalu, Ekere, & Olagbegi, 2017). Los factores utilizados en la comparación incluyen PCE, EPBT, rendimiento a alta temperatura y baja irradiancia, complejidad del proceso de fabricación, huella de carbono y costo.

Tabla A 20
Comparación de los materiales de las células fotovoltaicas comerciales

| Tipo de celda | Silicio cristalino | | | Película delgada | |
|---|---|---|--|--|--|
| | Monocristalino | Policristalino | Silicio amorfo | Teluro de cadmio | CIGS |
| Eficiencia máxima | 25% | 20% | 13% | 21% | 20% |
| Efecto de alta temperatura en la eficiencia | Caída del 15 % | Caída del 20% | 0% de caída | 0% de caída | 0% de caída |
| Coefficiente de temperatura $p_{\text{Máximo}}$ | -0,5% | -0,5% | -0,25% | 0% | 0% |
| Rendimiento de baja irradiancia | Reducción de potencia de salida | Reducción de potencia de salida | Bajo impacto en la potencia de salida | Bajo impacto en la potencia de salida | Bajo impacto en la potencia de salida |
| Temperatura de rendimiento óptima. | Funciona bien en climas fríos, pero mal en climas cálidos | Funciona bien en climas fríos, pero mal en climas cálidos | Funciona bien en climas fríos, climas cálidos incluso en calor extremo | Funciona bien en climas fríos, climas cálidos incluso en calor extremo | Funciona bien en climas fríos, climas cálidos incluso en calor extremo |
| Superficie para una potencia de 1 kW | 7-9 m ² | 8-9 m ² | 13-20 m ² | 11-13 m ² | 9-11 m ² |
| Costo (\$/W) | 1.6 | 1.4 | 0.8 | 0.7 | 0.75 |

| Tipo de celda | Silicio cristalino | | | Película delgada | |
|--|-----------------------------------|--|--|---|---|
| | Monocristalino | Policristalino | Silicio amorfo | Teluro de cadmio | CIGS |
| Complejidad del proceso de fabricación | complicado, sofisticado y caro | Más simple y menos costoso que el monocristalino | Menor costo que el silicio cristalino porque se requiere menos silicio | Menor costo y menos sofisticado que el silicio cristalino | Menor costo y menos sofisticado que el silicio cristalino |
| Huella de carbono (gCO₂-eq/kWh) | 45 | 44 | 50 | 35 | 46 |
| Tiempo de recuperación de la energía (EPBT) (meses) | 48 | 36 | 36 | 8 | 12 |
| Disponibilidad en el mercado | Fácilmente disponible y dominante | el más dominante y con la mayor cuota de mercado | Menos dominante que el silicio cristalino en el mercado | El mercado más grande de película delgada | Menos dominante que el silicio cristalino en el mercado |
| Efectos ambientales | Sin efectos conocidos | Sin efectos conocidos | Sin efectos conocidos | El cadmio elemental es tóxico | Sin efectos conocidos |

Nota. Fuente (A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate, 2017)

Anexo 12. Resumen de los elementos de la cadena de suministro de las tecnologías renovables y los problemas de sostenibilidad asociados a ellos.

Tabla A 21

Aplicaciones del estaño, las tierras raras, el cobalto y el litio en las tecnologías renovables y los problemas de sostenibilidad.

| | Estaño | Elementos de tierras raras | Cobalto | Litio |
|--|--|--|--|--|
| <i>Pertinencia</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Material semiconductor en energía solar fotovoltaica • Soldadura para energía solar fotovoltaica y turbinas eólicas • Baterías de iones de litio • Aerogeneradores • silicio amorfo en energía solar fotovoltaica • Capa de óxido de estaño para energía solar fotovoltaica de película delgada • perovskita a base de estaño en energía solar fotovoltaica • Galvanoplastia y soldadura en vehículos eléctricos • Motor de vehículo eléctrico | <ul style="list-style-type: none"> • Imanes permanentes de NdFeB en generadores de accionamiento directo en turbinas eólicas • Baterías de iones de litio • Motores de vehículos eléctricos • Generadores • Motores eléctricos híbridos | <ul style="list-style-type: none"> • Imanes permanentes de NdFeB en generadores de accionamiento directo en turbinas eólicas • Caja de engranajes en turbinas eólicas • Baterías de iones de litio • Motor de vehículo eléctrico | <ul style="list-style-type: none"> • Aerogeneradores • Baterías de iones de litio • Motor de vehículo eléctrico |
| <i>Cuestiones de sostenibilidad</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Trabajo infantil • las peores condiciones de trabajo | <ul style="list-style-type: none"> • Conflictos entre los lugareños y las empresas mineras | <ul style="list-style-type: none"> • Trabajo infantil • las peores condiciones de trabajo | <ul style="list-style-type: none"> • Vinculado a la violencia |

| | Estaño | Elementos de tierras raras | Cobalto | Litio |
|---|---|---|---|--|
| derechos humanos | <ul style="list-style-type: none"> • Los ingresos pueden apoyar a los señores de la guerra | <ul style="list-style-type: none"> • explotación • Trabajo infantil • las peores condiciones de trabajo | | |
| Mala gobernanza, corrupción o inestabilidad política | <ul style="list-style-type: none"> • vinculados a países con mala gobernanza • Reservas en estados (muy) frágiles • Alto riesgo político | <ul style="list-style-type: none"> • Reservas en estados (muy) frágiles • Alto riesgo político | <ul style="list-style-type: none"> • vinculados a países con una gobernanza muy deficiente • Reservas en estados (muy) frágiles • Alto riesgo político | <ul style="list-style-type: none"> • Vinculado a la corrupción • Gobernanza fallida • Ingresos utilizados para enriquecimiento personal • Reservas en estados frágiles |
| Toxicidad | <ul style="list-style-type: none"> • Toxicidad por metales pesados • Riesgos radiológicos | <ul style="list-style-type: none"> • citotoxicidad significativa • embolias pulmonares • puede ser fatal | <ul style="list-style-type: none"> • Enfermedad pulmonar de metales duros • Defectos congénitos • asma • puede ser fatal | <ul style="list-style-type: none"> • dificultad para hablar • confusión • puede ser fatal |
| Recursos finitos | <ul style="list-style-type: none"> • Se espera que las reservas se agoten | <ul style="list-style-type: none"> • metal crítico debido al monopolio de suministro | <ul style="list-style-type: none"> • Se espera que las reservas se agoten | <ul style="list-style-type: none"> • Las reservas podrían agotarse |

Nota. Fuente Cuestiones críticas de sostenibilidad en la producción de electricidad eólica y solar, así como en las instalaciones de almacenamiento y posibles soluciones - ScienceDirect

Anexo 13. Resultados de la evaluación de costos y beneficios del reciclaje de los paneles solares c-Si en China.

Los resultados de la evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida de las tecnologías para el reciclaje o disposición de los paneles solares c-Si en China, se resumen en la siguiente tabla.

Tabla A 22

Impactos ambientales de las diferentes tecnologías de reciclaje de residuos fotovoltaicos c-Si.

| Categoría de impacto | Abreviatura (unidad) | Reciclaje mecánico | Reciclaje químico | Reciclaje térmico | Vertedero |
|---|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|
| Cambio climático | PCA (kg CO2 eq) | (2225.17) | (5012.84) | (5524.45) | 19,000.00 |
| Demanda de energía primaria | PED (MJ) | (28,948.81) | 23,894.09 | (27,627.93) | 5200.00 |
| Acidificación | AP (kg SO2 eq) | (13.73) | 113.31 | (7.66) | 110.00 |
| Potencial de agotamiento abiótico | ADP (kg Sb eq) | (0.10) | (1.29) | (2.46) | 0.00 |
| Eutrofización | EP (kg PO43-eq) | (1.15) | 132.89 | 19.13 | 9.00 |
| Partículas | IR (kg PM2.5 eq) | (5.32) | 13.90 | (1.28) | 42.00 |
| Agotamiento del ozono | PAO (kg CFC-11 eq) | (0.00) | 0.00 | (0.00) | 0.00 |
| Formación fotoquímica de ozono | POFP (kg de COVNM eq) | (3.06) | (11.57) | 69.30 | 79.00 |
| Radiaciones ionizantes: efectos sobre la salud humana | IRP (kg U235 eq) | (52.23) | (46.39) | (24.92) | 3400.00 |
| Toxicidad en humanos: efectos cancerígenos | Cáncer de TH (CTUh) | (0.00) | (0.00) | (0.00) | 0.00 |
| Toxicidad humana: efectos no cancerígenos | HTA–no cáncer (CTUh) | (0.00) | 0.00 | (0.00) | 0.00 |

| Categoría de impacto | Abreviatura (unidad) | Reciclaje mecánico | Reciclaje químico | Reciclaje térmico | Vertedero |
|-------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| Oxidación del nitrógeno | NOx (kg) | (6.39) | 151.29 | 75.60 | 0.00 |
| Amonio | NH3-N (kg) | (0.04) | (0.54) | (0.72) | 0.00 |
| Uso de agua industrial | IWU (kg) | (12,130.11) | (65,069.17) | (60,103.62) | 480.00 |

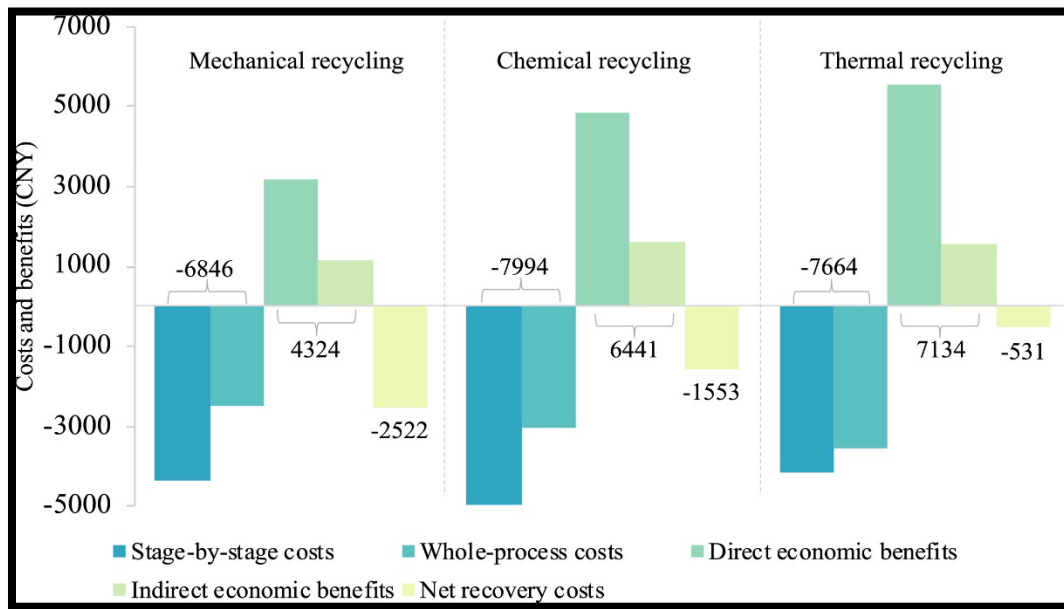
Los números encerrados entre paréntesis son negativos, representan los beneficios ambientales para los indicadores de impacto correspondientes. Las cifras positivas se refieren a la carga ambiental.

Nota. Fuente: Análisis del ciclo de vida de los costes económicos y los beneficios medioambientales del reciclaje de residuos de módulos fotovoltaicos en China - ScienceDirect

En la siguiente figura se presentan los resultados de la evaluación de los beneficios y costos de las tecnologías de reciclaje de paneles solares c-Si en China.

Figura A 8

Beneficios y costos totales divididos por diferentes categorías de los tres tratamientos para reciclar 1 tonelada de residuos de módulos fotovoltaicos



Fuente: Análisis del ciclo de vida de los costes económicos y los beneficios medioambientales del reciclaje de residuos de módulos fotovoltaicos en China - ScienceDirect

En la siguiente tabla se muestran los ingresos por la venta del vidrio y los metales recuperados para todos los tratamientos de reciclaje de los módulos fotovoltaicos c-Si y los beneficios indirectos por la creación de puestos de trabajo y la reducción de costos sociales.

Tabla A 23
Beneficios económicos divididos por los diferentes indicadores para reciclar 1 tonelada de residuos fotovoltaicos.

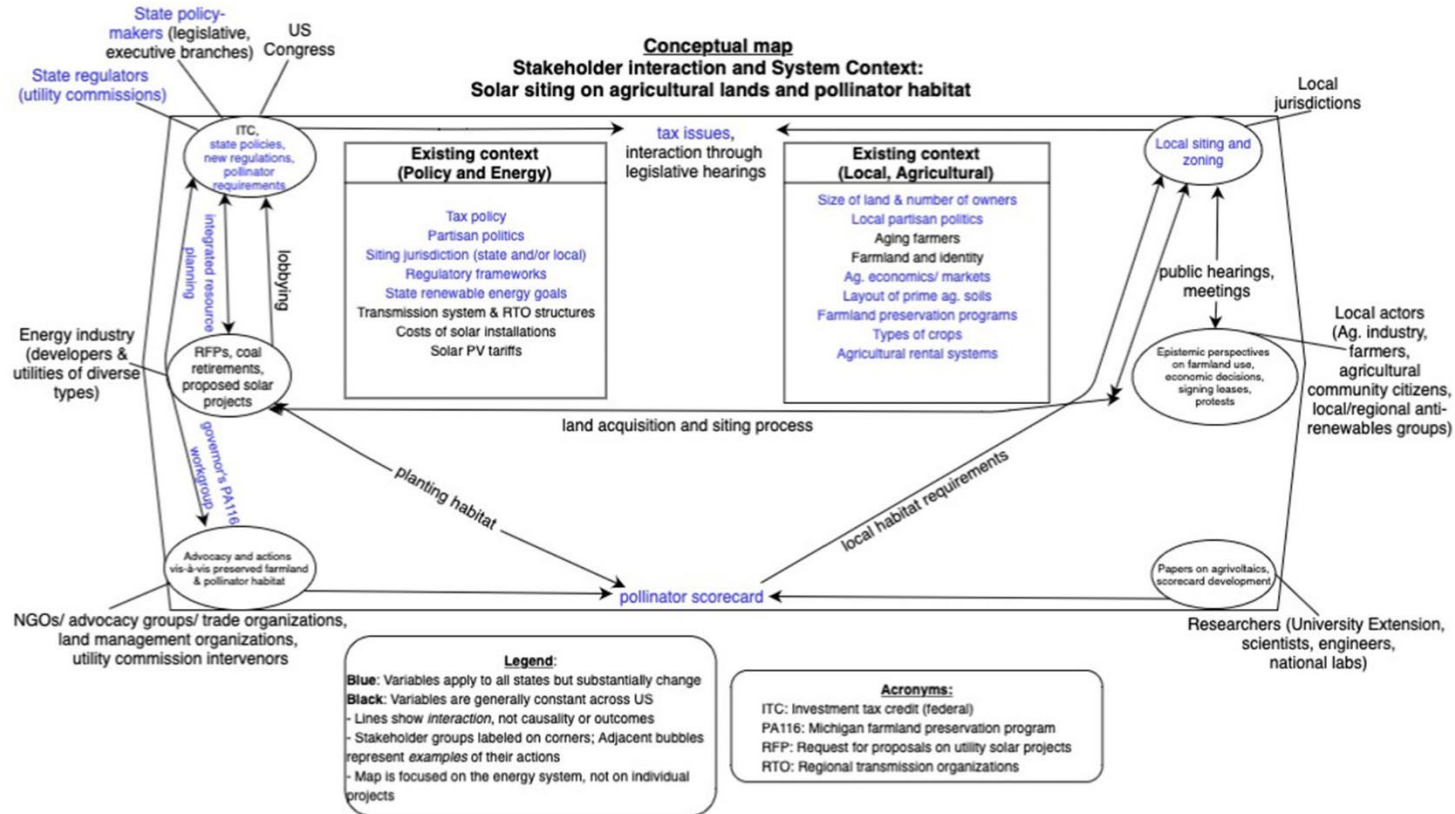
| | | Mechanical recycling(CNY) | Percentage | Chemical recycling(CNY) | Percentage | Thermal recycling(CNY) | Percentage |
|--------------------------|---------------------|---------------------------|------------|-------------------------|------------|------------------------|------------|
| Sale incomes | Al | 1500.22 | 34.70% | 1500.22 | 23.29% | 1522.01 | 21.34% |
| | Cu | 363.82 | 8.41% | 472.21 | 7.33% | 404.05 | 5.66% |
| | Glasses | 235.21 | 5.44% | 295.53 | 4.59% | 309.49 | 4.34% |
| | Si | 0.00 | 0.00% | 844.81 | 13.12% | 1357.18 | 19.02% |
| | Ag | 0.00 | 0.00% | 1713.48 | 26.60% | 1974.23 | 27.67% |
| | Metallic mixture | 1076.14 | 24.89% | 0.00 | 0.00% | 0.00 | 0.00% |
| | | | | | | | |
| Indirect benefits | Al | 112.00 | 2.59% | 111.24 | 1.73% | 126.04 | 1.77% |
| | Cu | 0.24 | 0.01% | 0.29 | 0.00% | 0.47 | 0.01% |
| | Glasses | 15.65 | 0.36% | 423.91 | 6.58% | 239.87 | 3.36% |
| | Si | 0.00 | 0.00% | 8.70 | 0.14% | 161.79 | 2.27% |
| | Ag | 0.00 | 0.00% | 0.31 | 0.00% | 4.15 | 0.06% |
| | Metallic mixture | 0.74 | 0.02% | 0.00 | 0.00% | 0.00 | 0.00% |
| | Recovered power | 0.57 | 0.01% | 30.07 | 0.47% | 6.92 | 0.10% |
| Social benefits | Employment increase | 1010.40 | 23.37% | 1010.40 | 15.69% | 1010.40 | 14.16% |
| | Power saving | 8.92 | 0.21% | 29.50 | 0.46% | 17.12 | 0.24% |
| Total benefits | | 4323.90 | | 6440.68 | | 7133.71 | |

Nota. Fuente: Análisis del ciclo de vida de los costes económicos y los beneficios medioambientales del reciclaje de residuos de módulos fotovoltaicos en China - ScienceDirect

Anexo 14. Mapa conceptual creado para los sistemas agrovoltaicos

Figura A 9

Modelo conceptual de las interacciones de las partes interesadas y el contexto del sistema para la ubicación de la energía solar en tierras agrícolas.



Nota. Fuente: ¿Podemos tener energía limpia y cultivar también nuestros cultivos? Emplazamiento solar en tierras agrícolas en los Estados Unidos - ScienceDirect