



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación de Sostenibilidad de la Generación de Energía Eléctrica para el Municipio de Leticia

Yuly Tatiana Trujillo Moreno

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá, Colombia
Agosto, 2025

Evaluación de Sostenibilidad de la Generación de Energía Eléctrica para el Municipio de Leticia

Yuly Tatiana Trujillo Moreno

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Ingeniería Ambiental

Director:
Ph.D., Paulo César Narváez Rincón

Línea de Investigación:
Procesos Sostenibles

Grupo de Investigación:
Procesos Químicos y Bioquímicos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá, Colombia
Mayo, 2025

A mi familia, y a mis hermanas y hermano: que este logro les recuerde que los sueños sí se cumplen y que el horizonte llega hasta donde ustedes decidan.

A Alejandro, por ser una fuente inagotable de paz y sosiego; en los días en que más desfallecí escribiendo e investigando, tu calma me sostuvo. Fuiste mi refugio.

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a Dios, quien me concedió la oportunidad de estudiar esta maestría, y puso en mi camino a las personas que me ayudaron a cursarla y completarla.

A mi mamá, a mis hermanas y hermano, a mi cuñado y a mis sobrinos, porque fueron agua en el desierto y luz en las noches. Por su amor incondicional y su confianza ciega en mis capacidades.

A Lina, por su paciencia y su aliento en los momentos difíciles.

A la Universidad Nacional de Colombia y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, por confiar en las personas de las periferias y darles la oportunidad de aportar a la construcción de país.

A mis compañeros y amigos, con quienes compartí este camino. Gracias por las enriquecedoras discusiones académicas, los cafés, el apoyo moral incondicional y por hacer de estos años una experiencia inolvidable y llena de aprendizaje mutuo. Una especial mención a Naisla, Camilo, Fredy y Fabian.

A mi director de tesis, Prof. Paulo César Narvárez, por su excepcional guía académica, su paciencia infinita y su constante motivación. Sus acertadas observaciones, su rigurosidad conceptual y su confianza en mi trabajo aun cuando yo dudara.

Resumen

Evaluación de Sostenibilidad de la Generación de Energía Eléctrica para el Municipio de Leticia

El suministro de energía eléctrica en Zonas No Interconectadas (ZNI) como Leticia, Amazonas, presenta complejos desafíos de sostenibilidad debido a la alta dependencia de combustibles fósiles, con elevados costos económicos, sociales y ambientales. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la sostenibilidad de las alternativas energéticas técnicamente viables para dicho municipio.

Para ello, se desarrolló y aplicó un marco de evaluación multicriterio, cuya principal innovación reside en su estructura jerárquica de cinco dimensiones: ambiental, social, económica, tecnológica y política, fundamentada en principios de sostenibilidad validados y ponderados a través de la participación de actores claves de diferentes sectores del territorio. Se evaluaron cinco alternativas: solar fotovoltaica, microhidroeléctrica, Residuos Sólidos Urbanos, Aceites de Cocina Usados y diésel como línea base, mediante la aplicación del método TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution).

Los resultados establecen un ranking de preferencia claro, concluyendo que la energía solar fotovoltaica con un coeficiente de sostenibilidad de 0.712 es la opción más sostenible para Leticia, seguida por la microhidroeléctrica con un coeficiente de sostenibilidad de 0.660. Se evidenció que, a pesar del menor costo de la hidroeléctrica, el desempeño superior de la solar en las dimensiones ambiental y social (que fueron las más valoradas por la comunidad) determinaron su posicionamiento.

Este estudio no solo proporciona una hoja de ruta estratégica para la transición energética de Leticia, sino que también aporta un modelo metodológico robusto y replicable para la toma de decisiones en otras ZNI, demostrando la importancia de integrar el análisis técnico con la validación social para una planificación energética verdaderamente sostenible.

Abstract

Sustainability Assessment of Electricity Generation for the Municipality of Leticia

Providing electrical energy in non-interconnected zones (NIZs), such as Leticia in the Amazonas region, presents complex sustainability challenges due to high dependence on fossil fuels, resulting in elevated economic, social and environmental costs. The aim of this research was to assess the sustainability of technically viable energy alternatives for the aforementioned municipality.

To this end, a multicriteria evaluation framework was developed and applied. The framework's primary innovation lies in its hierarchical structure, comprising five dimensions: environmental, social, economic, technological and political. The framework is based on sustainability principles that were validated and weighted through the participation of key stakeholders from various sectors within the territory. Five alternatives were evaluated using the TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) method: solar photovoltaic, micro-hydroelectric, municipal solid waste, used cooking oils, and diesel as the baseline.

The results clearly show that solar photovoltaic energy is the most sustainable option for Leticia, with a sustainability coefficient of 0.712, followed by micro-hydroelectric energy with a coefficient of 0.660. Despite the lower cost of hydroelectric power, the superior performance of solar energy in the environmental and social dimensions — which were the most valued by the community — determined its positioning.

This study provides a strategic roadmap for Leticia's energy transition and contributes a robust, replicable model for decision-making in other NIZs. It demonstrates the importance of integrating technical analysis with social validation for genuinely sustainable energy planning.

Contenido

Resumen	V
Abstract	VI
Introducción	1
1 Antecedentes	4
1.1 Contexto Mundial de la energía eléctrica	4
1.2 Contexto Nacional de energía eléctrica	7
1.3 Contexto Regional y Local	10
1.3.1 Contexto departamental de la energía eléctrica.	10
1.3.2 Contexto de la energía eléctrica en Leticia	11
1.3.3 Caracterización del municipio de Leticia	12
1.4 Conceptos básicos de la sostenibilidad	14
1.4.1 Sostenibilidad energética.....	14
1.4.2 Dimensiones de la sostenibilidad energética	15
1.4.3 Principios criterios e Indicadores de sostenibilidad	16
1.4.4 Métodos de evaluación para la sostenibilidad energética	19
2 Planteamiento del problema y estudio de caso	22
2.1 Problema de investigación	22
2.2 Justificación	24
2.3 Objetivos.....	25
2.3.1 General	25
2.3.2 Específicos.....	25
2.4 Metodología	25
3 Marco Metodológico y Diseño de la Investigación.....	27
3.1 Revisión Bibliográfica y Diagnóstico Conceptual	27
3.1.1 Estrategia de búsqueda y selección de fuentes.	27
3.1.2 Resultados clave de la revisión bibliográfica	28
3.1.3 Hallazgos clave y brechas identificadas.....	31
3.1.4 Respuesta a las brechas: contribución y enfoque del estudio	31
3.2 Arquitectura del Modelo Conceptual de Evaluación (D-P-C-I)	32
3.3 Análisis de viabilidad y selección de alternativas energéticas.	33

3.3.1	Proceso para la Selección de Alternativas.....	33
3.3.2	Potencial Estimado por Tecnología	34
3.3.3	Síntesis de Resultados del Análisis Técnico	36
3.4	Proceso de consulta local mediante encuesta y asignación de pesos al modelo. ..	36
3.4.1	Preparación de la consulta: estructuración de principios y dimensiones.....	37
3.4.2	Proceso de consulta: instrumento, muestreo y participantes.	39
3.4.3	Resultados y análisis de la consulta local	40
3.4.4	Estructura final del marco de evaluación.	43
3.5	Selección del Método de Análisis Final.	45
4	Aplicación del Modelo y Discusión de Resultados.	47
4.1	Construcción de la Matriz de decisión	47
4.1.1	Recopilación y Sistematización de los datos.....	48
4.1.2	Matriz de decisión Inicial.....	50
4.2	Aplicación del Método TOPSIS	52
4.2.1	Normalización de la Matriz.....	52
4.2.2	Ponderación de la Matriz.	54
4.2.3	Determinación de la Solución Ideal y coeficiente de cercanía	55
4.3	Resultados del Análisis	57
4.4	Discusión de Resultados.....	58
5	Conclusiones y recomendaciones.....	62
	ANEXO A: Listado de Dimensiones, Criterios e Indicadores tomados de la Literatura	64
	ANEXO B: Lista de principios.....	79
	ANEXO C: Filtro de los indicadores.....	88
	ANEXO D: Encuesta Generada	91
	Bibliografía	95

Índice de Tablas

Tabla 1-1. Descripción General de las Principales fuentes de Energía	5
Tabla 1-2. Capacidad Instalada de Energía Eléctrica	8
Tabla 1-3. Definición de las Dimensiones Sostenibles	15
Tabla 1-4: Definición de los principios de sostenibilidad	17
Tabla 1-5: Definición de los criterios de sostenibilidad	18
Tabla 1-6. Definición de los Indicadores de Sostenibilidad	18
Tabla 3-1. Potencial energético anual por fuente	36
Tabla 3-2. Principios de Sostenibilidad presentados en la encuesta.	38
Tabla 3-3. Importancia de los principios según los actores locales.....	42
Tabla 3-4. Principios Finales para la Evaluación de Sostenibilidad	42
Tabla 3-5. Consolidación de la evaluación de Sostenibilidad	44
Tabla 4-1. Indicadores Ambientales	48
Tabla 4-2. Indicadores Sociales	49
Tabla 4-3. Estimación del Costo Nivelado de la Electricidad de las Fuentes de Energía Evaluadas.....	49
Tabla 4-4. Indicadores Tecnológicos	50
Tabla 4-5. Indicadores Políticos	50
Tabla 4-6. Valores de los indicadores.....	51
Tabla 4-7. Matriz de decisión normalizada.	53
Tabla 4-8. Pesos finales de los indicadores.	55
Tabla 4-9. Ranking de Sostenibilidad para las Alternativas Energéticas en Leticia.....	58

Índice de Figuras

Figura 1-1. Contexto ZNI (Tomada de CNM - IPSE 2025 [14]).....	9
Figura 1-2. Localización del Municipio de Leticia[63].	13
Figura 1-3. Estructura de evaluación de la sostenibilidad energética	15
Figura 3-1. Red de coocurrencias de palabras clave	29
Figura 3-2. Evolución temática 2004 - 2024.	30
Figura 3-3. Proceso de Selección y Filtrado de Alternativas Tecnológicas	34
Figura 3-4 Distribución de Participantes en la Encuesta Por Sector.	40
Figura 3-5. Factores de Decisión para la Selección de una fuente de Energía.....	41
Figura 3-6 Porcentaje de importancia de las dimensiones según los actores locales	41
Figura 3-7. Aceptación de las fuentes de energía	43

Lista de Abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
WEO	World Energy Outlook
ZNI	Zonas no Interconectadas
SIN	Sistema Interconectado Nacional
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energías Renovables
ER	Energías Renovables
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
CEPAL	Comisión Económica Para América Latina y el Caribe
IPSE	Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
CNM	Centro Nacional de Monitoreo
IRENA	Agencia Internacional de las Energías Renovables
WCED	World Commission on Environment and Development
ESFV	Energía Solar Fotovoltaica
DS	Desarrollo Sostenible
SE4ALL	Energía Sostenible Para Todos
COP	Conferencia de las Partes
MCDA	Análisis Multicriterio de Decisión
ACV	Análisis del Ciclo de Vida
GEI	Gases de Efecto Invernadero

Abreviatura Término

OMM	Organización Meteorológica Mundial
PND	Plan Nacional de Desarrollo
ENAM	Empresa de Energía para el Amazonas
ESFV	Energía Solar Fotovoltaica
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
ACU	Aceite de Cocina Usado
RoR	Run of River
MCDM	Métodos de Análisis Multicriterio
USPDL	Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios de Leticia
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
PEN	Plan Energético Nacional
Findeter	Financiera de Desarrollo Territorial
IEA	Agencia internacional de Energía
LCOE	Costo Nivelado de Energía
PIB	Producto Interno Bruto
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
ACV	Análisis del Ciclo de (LCA siglas en inglés)
CCV	Costos Ciclo de Vida (LCC siglas en inglés)
S-ACV	Análisis del Ciclo de Vida Social (S-LCA siglas en inglés)
ESCA	Evaluación de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA siglas en inglés)
FSSD	Framework for Strategic Sustainable Development
GRI	Global Reporting Initiative
EISD	Energy Indicators for Sustainable Development
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
AED	Análisis envolvente de datos (DEA siglas en inglés)
AFE	Análisis de Fronteras Estocásticas (SFA siglas en inglés)
EEIO	Environmental Extended Input-Output
MRIO	Multiregional Input-Output

Introducción

El crecimiento poblacional y la lucha contra el cambio climático han impulsado la transición hacia un consumo eléctrico limpio y sostenible. En este contexto el acceso a la energía eléctrica resulta elemental para garantizar la prestación y la calidad de servicios y derechos como salud, educación y seguridad alimentaria, esenciales para el desarrollo social económico y ambiental de las naciones [1], [2]. Así, el Acuerdo de París de 2015 marcó un hito global, en el que 196 países se comprometieron a limitar el calentamiento por debajo de los 2°C [3]. Se proyecta que la participación de la electricidad en la demanda energética mundial crecerá a una tasa anual del 0,8% entre 2023 y 2030, consolidándose como un vector fundamental para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Este crecimiento plantea desafíos significativos, especialmente en términos de sostenibilidad, aunque se estima que aproximadamente el 80% de la nueva demanda será cubierta por fuentes renovables [4], [5].

Para garantizar el bienestar humano y el crecimiento económico es esencial contar con sistemas eléctricos robustos; sin embargo, las preocupaciones por el cambio climático y la seguridad energética impulsan esfuerzos para mitigar los impactos ambientales, destacando la necesidad de evaluar la sostenibilidad de la generación eléctrica futura. Aunque, los enfoques existentes varían en alcance y metodología, las naciones están apostando por fuentes de energía sostenible para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, cuyas reservas son limitadas y tienen impactos ambientales negativos [6], [7].

A pesar de estos avances, el 9% de la población mundial sigue sin acceso a la electricidad y de este porcentaje, el 84% vive en áreas rurales de países en desarrollo enfrentando desafíos significativos debido a la precaria electrificación rural [8]. La conexión a la red eléctrica en estas zonas es muchas veces inviable debido a largas distancias, complicada

topografía, baja densidad poblacional y pobreza. Como alternativa, se han comenzado a implementar tecnologías independientes que utilizan recursos renovable locales como biomasa o energía hidroeléctrica, las cuales son de bajo costo, satisfacen necesidades locales y permiten la participación comunitaria [9].

Ahora bien, los mayores atrasos en conexión energética se encuentran en países en vías de desarrollo y Colombia no es la excepción a estos desafíos. El 53% del territorio nacional corresponde a zonas fuera de la red, y cada una presenta características particulares que dificultan el desarrollo de soluciones generales [10]. Dado que en el país no existe una metodología definida para identificar las alternativas más sostenibles en municipios, corregimientos, localidades y caseríos que no hacen parte del Sistema Interconectado Nacional (SIN), es pertinente y necesario promover la investigación aplicada para establecer marcos de evaluación que permitan elegir la forma de producción energética más adecuada a partir de energías limpias, aprovechando recursos locales como la biomasa, la energía hidroeléctrica de los ríos, la energía solar, entre otros [11].

El departamento del Amazonas hace parte del territorio aislado. Este departamento enfrenta desafíos significativos en el suministro de energía debido a su extensión, baja densidad poblacional y asentamientos distantes. Su riqueza natural, marcada por una flora y fauna abundantes, y el río Amazonas, complican los esfuerzos logísticos y demandan grandes recursos para cualquier proyecto de interconexión eléctrica [12], [13]. La capital, Leticia, cuenta con un suministro eléctrico constante en su casco urbano a partir de combustible diésel, el cual cubre un 96,3% de Leticia. El resto son caseríos, corregimientos y resguardos indígenas donde la extensión de la red presenta enormes retos [14]. Por consiguiente, la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles se torna imperativa, requiriendo un enfoque meticuloso que tenga en cuenta tanto las particularidades geográficas como las necesidades de la población dispersa [13].

La dependencia de una fuente de origen fósil implica diferentes problemáticas asociadas al transporte, almacenamiento y distribución del combustible, así como un mayor costo económico y ambiental en comparación con el resto del país. Por ello, el objetivo principal de este estudio es evaluar la sostenibilidad de las tecnologías de suministro de energía

eléctrica para la ciudad de Leticia, con el fin de identificar las alternativas que respondan adecuadamente a los desafíos propios de este territorio.

Este documento se estructura en cinco capítulos. El Capítulo 1 presenta el marco teórico, abordando el contexto energético a nivel internacional, nacional y local, junto con los conceptos de sostenibilidad. El Capítulo 2 detalla el planteamiento del problema y el estudio de caso. El Capítulo 3 describe el marco metodológico diseñado, incluyendo el análisis de viabilidad técnica y la aplicación de una metodología multicriterio. El Capítulo 4 presenta y discute los resultados obtenidos. Finalmente, el Capítulo 5 expone las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación.

1 Antecedentes

La creciente presión por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, garantizar el acceso universal a la electricidad y enfrentar los desafíos del cambio climático ha impulsado una transformación profunda en los sistemas energéticos a nivel global. Este proceso es especialmente complejo en territorios rurales y apartados de Colombia, donde factores geográficos, sociales y económicos dificultan la implementación de soluciones convencionales. Frente a este panorama, la identificación de tecnologías energéticas que integren criterios de sostenibilidad ambiental, social, económica técnica e institucional se vuelve indispensable para orientar decisiones estratégicas que respondan a las condiciones específicas de cada región. Este capítulo presenta una revisión del contexto internacional, nacional y regional del sector eléctrico, así como los fundamentos conceptuales necesarios para analizar alternativas energéticas viables y sostenibles en zonas como el municipio de Leticia, Amazonas.

1.1 Contexto Mundial de la energía eléctrica

Históricamente, la energía ha sido clave para el progreso humano, pues ha propiciado inversiones, innovaciones y el desarrollo socioeconómico. Sin embargo, su utilidad también ha generado una relación de dependencia que influye de manera sustancial en las relaciones tecnológicas, económicas, políticas, sociales y ambientales dentro y entre los países [15]. En la tercera década del siglo XXI, el cambio climático, el crecimiento poblacional, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y el aumento de la demanda energética intensificaron la preocupación mundial por la seguridad energética y la sostenibilidad [16]. En respuesta, los gobiernos han promovido el uso de energías limpias y sostenibles [5], [17], en el marco de cumplimiento de compromisos internacionales (Acuerdo de París, Protocolo de Kioto, Conferencias de las Partes (COP)) y de iniciativas

(“Energía Sostenible para todos” (SE4ALL) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible), en especial el ODS 7, que busca “garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos” [18], [19], [20], [21].

A pesar de un crecimiento notable de las fuentes de energía más limpias en la última década, la transición está lejos de completarse [22]. En 2022 la generación eléctrica mundial fue de 637,8 cuatrillones BTU, de los cuales el 79,9% provino de fuentes convencionales (carbón, gas, petróleo), 4,34% de energía nuclear y solo el 15,76% de energías renovables, reflejando la dominancia actual de los combustibles fósiles pese a su impacto ambiental [23], [24]. Esta situación no solo impacta las emisiones globales, sino que también agrava la desigualdad en el acceso: 789 millones de personas carecen de electricidad [25], principalmente en áreas rurales del sur global. En dichas regiones, la falta de acceso a electricidad provoca inseguridad energética y limitan el desarrollo de comunidades vulnerables [5], [17].

Las soluciones fuera de la red, han surgido como alternativas eficaces para mejorar el acceso y reducir las emisiones nocivas, gracias a su adaptación a las condiciones locales [26], [27]. No obstante, para que estas soluciones sean sostenibles, se requiere una inversión constante y la superación de limitaciones estructurales. Pero, muchas iniciativas han fracasado [28], debido principalmente a la falta de estudios de viabilidad adaptados, gestión de riesgos inadecuada y ausencia de políticas claras que garanticen la sostenibilidad a largo plazo [26], [29].

Este panorama ha impulsado la diversificación a través de diversas fuentes no convencionales. La Tabla 1-1 presenta una descripción general de las principales fuentes de energía, destacando tanto las convencionales como las alternativas, y destacando sus características y potencial en el contexto energético global actual.

Tabla 1-1. Descripción General de las Principales fuentes de Energía

Tipo energía	Fuente	Descripción/características
Convencional	Carbón, petróleo (Diesel, ACPM), Gas Natural	Son no renovables de fácil acceso, aunque han tenido una disminución en sus fuentes y elevadas emisiones de CO2 [20]. Presentan un costo accesible en el mercado.
Solar	Sol	Aprovecha la radiación solar para generar electricidad (fotovoltaica) o calor (térmica). Es limpio, renovables y tiene aplicaciones como paneles fotovoltaicos, y una alta disponibilidad [20].
Eólica	Viento	Utiliza la fuerza del viento para generar electricidad mediante aerogeneradores. Puede instalarse en tierra (onshore) o en el mar (offshore) [20].
Biomásica	Material Orgánico	Proviene de material orgánico (vegetales, residuos, aceites) [30].
Hidroeléctrica	Agua	Utiliza el movimiento del agua (ríos, represas) para generar electricidad. Tecnología madura y confiable [31].
Nuclear	Uranio, Plutonio	Genera energía mediante fisión nuclear. Es eficiente y de bajas emisiones, aunque implica riesgos y altos costos. Produce actualmente alrededor del 10% de la energía mundial. Es una gran alternativa para lograr la meta de emisiones netas cero a 2050 [8].
Mareomotriz	Mareas	Convierte la energía cinética y potencial del movimiento de las mareas en electricidad. Requiere alta inversión inicial [33].
Geotérmica	Calor subterráneo	Extrae calor del subsuelo para generar electricidad o calefacción. El calor se extrae del subsuelo y se transfiere a ciclos de energía sobre el suelo (por ejemplo, ciclo orgánico de Rankine (ORC), flash simple o doble y vapor seco). Ideal para regiones con actividad geotérmica elevada [33].
Hidrógeno	Hidrógeno	El hidrógeno es un portador de energía versátil. Se obtiene de distintas fuentes y utilizando diferentes procesos. Según la tecnología de producción utilizada, el hidrógeno se identifica con un color. Los procesos más utilizados son la electrólisis y el reformado con vapor [34]

De las fuentes de energía mencionadas en la Tabla 1-1, en lo que respecta al aspecto técnico, la energía solar fotovoltaica (SPV) y las turbinas eólicas (WTB) se han consolidado como las tecnologías más prometedoras, debido a su creciente popularidad y la reducción de costos tecnológicos [25], [35]. Estas tendencias continuarán gracias a políticas de promoción energética, lo que incrementa la necesidad de garantizar que estas tecnologías sean controlables y cuenten con capacidades de almacenamiento a gran escala para mitigar su intermitencia. Por consiguiente, la adecuada integración de las tecnologías de

almacenamiento de energía es un requisito indispensable para garantizar un diseño rentable y confiable de estas tecnologías[35].

Actualmente, el 30% de la energía primaria en América Latina y el Caribe proviene de fuentes renovables, aunque solo el 17% se destina a la producción de electricidad [17], [36], [37]. Para mejorar esta situación, se han promulgado políticas que promueven el uso de energías alternativas y reducen las emisiones de GEI, desarrollando sistemas híbridos que combinan fuentes de energías alternativas con recursos convencionales. Esto busca aportar a la sostenibilidad, con el objetivo de mejorar la aplicación de los mix energéticos dentro y fuera de la red, por ejemplo, entre 2000 y 2021, el acceso a electricidad en zonas rurales incrementó 25,7% [38], [39].

Con eso y todo, las dificultades socioeconómicas de los países con déficit de acceso a electricidad dificultan evaluar el progreso hacia la electrificación, debido a que no recopilan los datos necesarios para determinar fehacientemente los avances en materia de electrificación. Adoptar un enfoque basado en múltiples criterios permitirá a los gobiernos a identificar cuellos de botella, comprender su estado actual y tomar decisiones informadas para lograr el acceso universal de manera más eficiente [26]. Además, los componentes renovables suelen requerir una alta inversión inicial, pero tienen bajos costos de operación, mientras que los generadores diésel presentan costos iniciales más bajos de capital, pero mayores costos operativos [40].

1.2 Contexto Nacional de energía eléctrica

En Colombia el crecimiento económico [16] ha aumentado la demanda de energía, mostrando el paso de un país poco interconectado e industrializado a uno con un sistema de producción de energía más interconectado y moderno. Dado que el sector energético sustenta a toda la economía del país, es crucial incorporar criterios de sostenibilidad en sus reformas y políticas para que el desarrollo de este sector sea un requisito previo que impulse el crecimiento de las industrias clave y del PIB nacional [41]. Con una alta dependencia de

fuentes hidroeléctricas la diversificación energética se posiciona como una estrategia clave para garantizar la seguridad energética, reducir las emisiones de carbono y fomentar el crecimiento económico [42].

En línea con este objetivo de diversificación, el país cuenta con una capacidad instalada para la generación de energía eléctrica de 20.560 MW, dentro y fuera de la red. La energía hidráulica lidera la producción con un 65%, siendo la principal fuente dentro de la red con 13.206 MW. Por otra parte, la producción de energía en zonas fuera de la red está liderada por los combustibles fósiles (diésel) con 263,1 MW [43], [44]. La ley 1715 de 2014 promueve las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), catalogadas como ambientalmente sostenibles y subutilizadas en el país [38], [45]. Aunque su participación actual es limitada, se espera que representen el 17% de la capacidad instalada a 2039 y más del 40% para 2050 [43]. La Tabla 1-2 presenta los valores de la capacidad instalada de energía eléctrica en el país, tomada de los datos estadísticos del IRENA.

Tabla 1-2. Capacidad Instalada de Energía Eléctrica

Zona	Fuente de Energía	Generación en MW
Dentro de la red	Combustibles fósiles	5999
	Hidroeléctrica	13.206
	Solar fotovoltaica	665
	Biocombustibles sólidos y residuos renovables	6
	Bagazo	338
	Eólica Onshore	18
	Biogás	9
	Otras	5
Fuera de la red	Combustibles fósiles	263,1
	Hidroeléctrica	4,6
	Solar fotovoltaica	50,8
	otras	5,6

Fuente: datos IRENA [44]

Colombia ha afianzado su compromiso con la sostenibilidad energética mediante participación internacional y políticas internas, desde la adopción de los ODS hasta el CONPES 3918 de 2018 y el Decreto 280 que creó la Comisión de Alto Nivel para la Agenda

2030 [46]. El tercer informe nacional voluntario (2021) resaltó el rol del sector productivo y urgió a sostener los avances; en energía, la meta es lograr cobertura eléctrica total para 2030, integrando FCE y FNCER [47]. Para ello, el país promueve la ampliación de redes interconectadas y soluciones fuera de la red basadas en tecnologías como la solar fotovoltaica, pequeña hidroeléctrica, eólica, biomasa y geotérmica con el fin de atender zonas rurales e insulares que aún no están conectadas al sistema eléctrico nacional [48], [49].

Así mismo, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) integra todos los sistemas eléctricos para transportar la energía desde las centrales de generación hasta los centros de consumo. En contraste, las Zonas No Interconectadas abarcan áreas remotas fuera de la red, donde el SIN no llega debido a condiciones geográficas y ambientales. Estas zonas albergan 3.04% de la población como se muestra en la figura 1-1, tomada del Centro Nacional de Monitoreo (CNM) [13], [14], [50].



Figura 1-1. Contexto ZNI (Tomada de CNM - IPSE 2025 [14])

De manera específica, en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 se propuso como meta aumentar la capacidad de generación de energía limpia en 1.500 MW. Por un lado, estas

iniciativas aumentan la tasa de electrificación del país y por otro, reducen la fuerte dependencia del petróleo crudo, el gas natural y el carbón para la generación de energía en áreas rurales, porque la conexión a la red en estas zonas suele estar limitada por la geografía, el clima y los costos. Sin embargo, esta meta no se ha cumplido y se requiere un mayor compromiso por parte de los entes gubernamentales, para realizar estudios encaminados a aumentar estas cifras [51]. Por lo tanto, los proyectos remotos, que utilizan tecnologías renovables, tienen el potencial de mejorar el impacto ambiental del sistema eléctrico nacional y el cumplimiento de las metas de cobertura y sostenibilidad.

1.3 Contexto Regional y Local

1.3.1 Contexto departamental de la energía eléctrica.

Las ZNI se distinguen por su ubicación en la periferia del país, en territorios de difícil acceso y alta importancia ambiental, como el departamento del Amazonas. En general estos territorios están protegidos por normas que fomentan el cuidado de la tierra, a través de la protección de sus riquezas culturales y biodiversas [52], [53]. Debido a la importancia del Amazonas al abastecer de humedad a toda sur América, contribuyendo a la estabilización del clima mundial, esta se encuentra protegida por normativas que hacen inviable extender redes eléctricas convencionales [50].

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE), ha identificado que el modelo actual de expansión del sector eléctrico presenta dificultades para llevar el servicio de electricidad a la población que vive en las zonas rurales y no interconectadas por aspectos como [54]:

- zonas con características de difícil acceso y baja densidad poblacional,
- presencia de comunidades étnicas y restricciones ambientales,
- conflictos y escaso desarrollo económico de los territorios,
- ineficiente operación y mantenimiento de los sistemas de generación existentes,
- difícil acceso a programas de capacitación y formación,

- carencia de integración con los programas de desarrollo regional,
- elevados costos de prestación del servicio y baja rentabilidad de las inversiones
- bajos niveles de utilización del mismo,
- limitado aprovechamiento del potencial energético local, baja cobertura,
- reducido número de horas diarias de servicio y deficientes niveles de calidad y confiabilidad del servicio prestado

La fragilidad ecosistémica de la selva amazónica, obliga a que la zona sea abastecida por sistemas descentralizados. Para incentivar estos sistemas descentralizados de energía, se otorga un subsidio económico a las empresas prestadoras del servicio, con el objetivo de reducir los costos de inversión, dándoles el poder sobre la generación y distribución del servicio [9], [87].

Desde 2017, la Gobernación del Amazonas ejecuta tres proyectos solares fotovoltaicos en San Martín de Amacayacu, Macedonia y 20 de Julio con una capacidad instalada de 524.9 kWh, e incentiva el uso de energías renovables en áreas no municipalizadas y garantizar al menos cuatro horas adicionales de suministro diario [56]. Sin embargo, estos proyectos presentan problemas legales, debido a las concesiones otorgadas a la empresa de energía para el Amazonas ENAM, quien es la única autorizada para realizar y ejecutar estos proyectos [57], lo que restringen la participación de otros actores. Aunque existe un área de servicio exclusivo, alrededor de 160 comunidades aún carecen de acceso a electricidad [58]. Para abordar esta situación, la administración departamental ha propuesto estructurar proyectos energéticos en colaboración con las comunidades indígenas, utilizando fondos del Sistema General de Regalías (SGR), asegurando un seguimiento adecuado de los mismos en acuerdo con la empresa prestadora del servicio para el Amazonas ENAM.

1.3.2 Contexto de la energía eléctrica en Leticia

La capital del Amazonas cuenta con un suministro constante a partir de diésel, cuyos los costos de generación, distribución y comercialización son elevados y, por lo tanto, debe ser

subsidiado en un 80% por la nación [14]. Esta dependencia de combustibles fósiles genera impactos negativos económicos, ambientales y sociales. En lo económico, el uso de diésel implica altos costos operativos y expone a riesgos financieros por la volatilidad de precios y la limitada disponibilidad de un recurso no renovable; además, las dificultades de transporte y almacenamiento incrementan los riesgos para las empresas y para la seguridad de las personas [59].

Desde la perspectiva ambiental, el esquema produce emisiones contaminantes que contribuyen al cambio climático y a la degradación del entorno. Se suman la contaminación acústica de los grupos de generación y afectaciones a la calidad de vida de las comunidades aledañas. En términos técnicos, la infraestructura fósil presenta restricciones estructurales: suele requerir instalaciones a gran escala, con baja modularidad y limitada capacidad de adaptación a necesidades locales[59], [60], [61].

No obstante, la transición hacia fuentes alternativas en Leticia enfrenta la carencia de estudios y mediciones precisas sobre potenciales energéticos regionales, lo que dificulta planificar proyectos de suministro mediante tecnologías no convencionales [62]. Por ello, se requieren investigaciones y evaluaciones rigurosas que caractericen el potencial de estos recursos y orienten la implementación de soluciones sostenibles, pertinentes y adaptadas a las necesidades locales del municipio de Leticia [11].

1.3.3 Caracterización del municipio de Leticia

Leticia se encuentra al sur del país como se muestra en la Figura 1-2., ubicada en la triple frontera con Brasil y Perú. Limita al sur con el río Amazonas hasta Puerto Nariño; al este con la frontera de Brasil, específicamente con el municipio de Tabatinga por una línea fronteriza imaginaria de una longitud de 60 km a partir de Leticia y en que no hay ningún control migratorio; y otra franja de igual latitud desde Puerto Nariño hacia el norte. Sus coordenadas se encuentran entre 3°30' y 47°7' latitud sur, y entre 69°45' y 70°20' longitud oeste. La elevación promedio es de 84 metros sobre el nivel del mar, y la superficie es de aproximadamente 34.000 km² [63], [64].



Figura 1-2. Localización del Municipio de Leticia[63].

Leticia cuenta con una población de 53.293 habitantes de los cuales 49.137 son residentes en el casco urbano, quienes reciben un suministro de energía 24 horas al día a través de una central eléctrica cuya capacidad instalada es 18,1 MW. Esto representa el consumo energético del 12% en las zonas no interconectadas, superado únicamente por San Andrés Islas que tiene un consumo del 54% de los 98 municipios clasificados como ZNI. Esta energía en Leticia es generada en su totalidad a partir del combustible diésel y suministrado por la Empresa de Energía para el Amazonas S.A. E.S.P., ENAM [59], [64]. Esta empresa es la única que comercializa la electricidad, encargándose de la generación, transmisión y distribución a los usuarios finales, así como la gestión de todo el sistema eléctrico.

Con el propósito de mejorar la calidad del suministro de energía eléctrica, en el Plan de Desarrollo Municipal (PDM) de Leticia se adoptaron los ODS, incluido en ODS7. En este objetivo, el PDM propone un pacto por la eficiencia de los servicios públicos: agua y electricidad para promover la competitividad y el bienestar de todos [58]. Sin embargo, la última medición realizada a la cobertura de energía eléctrica en el municipio se realizó de manera oficial en el 2015, con un hallazgo del 96,9% de cobertura en suministro de energía eléctrica [58]. Evidenciando una falta de datos actualizados para la toma de decisiones Por ello, se hace necesario evaluar las fuentes propias de la región para plantear una matriz energética diversa que disminuya la dependencia al diésel y mejore la calidad de vida de sus pobladores.

Para estructurar una evaluación de este tipo, es indispensable primero establecer los fundamentos conceptuales sobre los que se construirá el análisis: la sostenibilidad y sus múltiples facetas.

1.4 Conceptos básicos de la sostenibilidad

Desde el informe “*los límites del Crecimiento*” (1972) y consolidados en el informe “*un futuro común*” (1987), la sostenibilidad surgió como un enfoque esencial para el desarrollo [1], [65], garantizando el uso responsable de los recursos, sin comprometer el bienestar de generaciones futuras. Su aplicación es clave en sectores como el ambiental, climático y energético para evitar el agotamiento de los recursos y mantener el equilibrio ecológico [66].

En este marco conceptual, distintos autores han definido la sostenibilidad y el desarrollo sostenible de diversas maneras. Mientras algunos utilizan ambos términos indistintamente otros consideran el desarrollo sostenible como un proceso de mejora continua para alcanzar la sostenibilidad con mínimo impacto ambiental y social, enfoque respaldado por los ODS [67]. Por otro lado, desde la perspectiva sistémica, la sostenibilidad es entendida como un estado del equilibrio dinámico entre las actividades humanas y la capacidad regenerativa de los ecosistemas, buscando alinear individuos, sociedad y economía con las funciones ecológicas que sustentan la vida en nuestro planeta [68]. Para evaluar los avances hacia este equilibrio se emplean indicadores flexibles que permiten un análisis integral de sus múltiples dimensiones [16], [69].

1.4.1 Sostenibilidad energética

Una energía sostenible gestiona eficientemente la demanda actual y futura, es asequible y reduce el impacto ambiental mediante fuentes alternativas, híbridas y de bajas emisiones de carbono [11], [70]. En este sentido un sector energético sostenible debe equilibra producción y consumo, minimizando el impacto ambiental y promoviendo el desarrollo

social y económico [69]. La evaluación de esta sostenibilidad se mide a través de un marco jerárquico compuesto por dimensiones, principios, criterios e indicadores, como se aprecia en la Figura 1-3.



Figura 1-3. Estructura de evaluación de la sostenibilidad energética

1.4.2 Dimensiones de la sostenibilidad energética

El concepto de dimensión en la sostenibilidad energética se refiere a los aspectos sobre los cuales se evalúa si un sistema energético es sustentable. Inicialmente, entre los años 70 y 80 la sostenibilidad se centraba en las dimensiones ambiental, económica y social, llamados por la WEC “*Trilema Energético*” [71]. Posteriormente, la WCED amplió su alcance, añadiendo dimensiones como la técnica, tecnológica, política, entre otras que continúan evolucionando según las necesidades humanas y los contextos de decisión [1]. A continuación, en la tabla 1-3 se presenta una síntesis de las características y el alcance de algunas de las principales dimensiones de la sostenibilidad energética, con el fin de facilitar su comprensión e interpretación en el contexto de este estudio.

Tabla 1-3. Definición de las Dimensiones Sostenibles

Dimensión	Definición
Social	Evalúa los efectos de la electrificación sobre la calidad de vida [72], la equidad, la aceptación y bienestar social, salud y seguridad, acceso y fiabilidad energética [1], [73] y el acceso equitativo a servicios básicos [9], [74], [75].
Económica	Se centra en los beneficios financieros y el impulso del desarrollo económico de la comunidad a partir de la electrificación [9].

Institucional	Cubre aspectos de gobernanza, gestión del proyecto y la capacidad de la organización [74] para mantener un desempeño adecuado a largo plazo [9].
Técnica	La dimensión técnica se centra en mantener los servicios de energía durante la vida útil económica del proyecto [74]. Esta dimensión en los proyectos de electrificación rural evalúa el desempeño del sistema, lo cual es clave para lograr el acceso global a energía confiable y moderna para todos [27]. Igualmente, la dimensión técnica abarca la operación y el mantenimiento de la tecnología y del servicio eléctrico [9].
Política	La dimensión política se refiere a las normativas que rigen una nación o un gobierno para cumplir con los compromisos adquiridos en distintos espacios [76], [77].
Tecnológica	La dimensión tecnológica busca proyectos que usen tecnologías compatibles con el entorno social y económico, que las tecnologías sean aprobadas y eficientes, que la operación pueda ser realizada con la capacitación adecuada del recurso humano local [9].
Ambiental	Analiza como la tecnología para la generación de energía eléctrica impacta en los recursos naturales y los efectos que el uso de dicha tecnología tiene en el ambiente, buscando conservar recursos naturales, evitar la degradación del medio ambiente y prevenir la contaminación [1], [77] desde una perspectiva local y global [9].

1.4.3 Principios criterios e Indicadores de sostenibilidad

Dentro de la estructura de evaluación, los principios son de aplicación general y al mismo tiempo, concretos para guiar y regir el análisis, la planificación, la innovación, la selección, el diseño y el uso coordinado de conceptos, métodos y herramientas complementarias, estos constituyen la lógica esencial que dirigen el sentido de la estructura de evaluación de sostenibilidad [78]. Es decir, son las ideas rectoras que irradian su lógica a todos los demás componentes de la estructura (criterios e indicadores), de manera que estos componentes concreten, materialicen y hagan tangibles las ideas representadas en dichos principios [79]. Los principios son una gran oportunidad para manifestar definiciones centrales y guiar la acción [80] (ej: “reducción del impacto ambiental”).

Los criterios son los estándares específicos y concretos mediante los cuales se evalúa el cumplimiento de los principios de una dimensión en particular [81]. Así, los criterios definen los principales aspectos verificables de los principios de cada dimensión del desarrollo sostenible, permitiendo observar si se materializa en la práctica (ej: “reducción de emisiones de GEI)

Los indicadores de sostenibilidad son las medidas concretas y verificables que se utilizan para constatar el cumplimiento de un criterio. Desempeñan un papel fundamental toda vez que constituyen el insumo tangible sobre el cual se tomarán finalmente las decisiones respecto a la sostenibilidad o no de un sistema de producción de energía. Este reconocimiento del papel que pueden desempeñar los indicadores se realizó en la Cumbre de la Tierra de 1992, de manera explícita en el capítulo 40 de la Agenda 21, que llama a todas las instituciones y organizaciones a desarrollar e identificar indicadores de desarrollo sostenible que puedan proporcionar una base sólida para la toma de decisiones en todos los niveles [1], [82].

Las tablas 1-4, 1-5 y 1-6, recogen, respectivamente, definiciones reportadas en la literatura para principios, criterios e indicadores, organizadas por dimensión (ambiental, social, económica, técnica/tecnológica, institucional y política)

Tabla 1-4: Definición de los principios de sostenibilidad

Dimensión	Principio
Social	El principio social se refiere a garantizar la equidad, la inclusión y la cohesión social, evitando obstáculos estructurales que limiten la participación ciudadana, el acceso a servicios básicos y el respeto a la diversidad cultural [75], [79]
Económico	El principio económico busca asegurar la viabilidad financiera y la eficiencia en el uso de recursos, promoviendo un suministro energético accesible, competitivo y sostenible a largo plazo, considerando costos totales, equidad intergeneracional y resiliencia económica [78], [83].
Institucional	El principio institucional se fundamenta en la gobernanza participativa, la transparencia y la estabilidad normativa, garantizando marcos regulatorios claros, respaldo institucional y capacidad de las organizaciones para sostener proyectos de manera duradera [18], [84]
Técnico	El principio técnico busca asegurar la confiabilidad, eficiencia y adaptabilidad de las tecnologías, garantizando que sean operables, mantenibles y adecuadas a las condiciones específicas del entorno local [84]
Política	El principio político implica la coherencia con las políticas energéticas nacionales e internacionales, la seguridad energética y la promoción de procesos de toma de decisiones inclusivos, estables y alineados con objetivos de desarrollo sostenible [84], [85].

Dimensión	Principio
Ambiental	El principio ambiental busca garantizar el uso sostenible de los recursos naturales, promoviendo la conservación de la biodiversidad, la mitigación del cambio climático y la restauración de los ecosistemas, en beneficio de las generaciones presentes y futuras [78].

Tabla 1-5: Definición de los criterios de sostenibilidad

Dimensión	Criterio
Social	El criterio social busca cuestiones de apalancamiento entre el principio y los indicadores, sabiendo que se enfocan en diversificar el empleo y la seguridad energética de los habitantes [86].
Económico	El criterio económico busca equilibrar los costos de vida de las personas a través de los costos asociados a la energía [86].
Institucional	-
Técnico	-
Política	-
Ambiental	El enfoque ambiental esta dado hacia la preservación de los recursos, evitando el agotamiento de recursos, evitando el cambio climático y reduciendo las emisiones de CO ₂ , concernientes a la generación de energía eléctrica [86].

Tabla 1-6. Definición de los Indicadores de Sostenibilidad

Dimensión	Indicador
Social	Los indicadores sociales están diseñados para reflejar el aspecto social de las opciones del sistema energético. En este sentido se entiende que cada sistema energético puede describirse con los respectivos parámetros sociales que reflejan los cambios en el entorno social [83]. Los indicadores sociales muestran los principales impactos locales de iniciativas de electrificación [8]. Es un indicador cualitativo.
Económico	Existen varios métodos para evaluar la atraktividad de las inversiones en sistemas energéticos. Entre ellos se encuentran: el método de recuperación de la inversión, el método de tasa de retorno promedio, el método de tasa interna de retorno, el método del valor presente y el enfoque de costos de ciclo de vida [8]. Es un indicador cuantitativo.
Institucional	Los indicadores institucionales engloban las decisiones de los principales promotores de la electrificación rural, así como los resultados a escala nacional [8]. Es un indicador cualitativo
Técnico	Los indicadores técnicos corresponden a estrategias con adaptaciones locales y sus resultados a nivel de beneficiarios [8]. Es un indicador cuantitativo
Política	Pueden ayudar a los responsables de las políticas a establecer objetivos, como esquemas sociopolíticos, para abordar cuestiones ambientales y energéticas como el calentamiento global y la contaminación del aire [87]. Es un indicador cualitativo
Ambiental	Los indicadores energéticos son medidas esenciales que ayudan a prevenir factores que afectan el medio ambiente (emisiones de GEI, CO ₂ , SO _x y NO _x) y mejorar la calidad de

Dimensión	Indicador
	vida de la población. El medio ambiente y la energía disponible son dos cuestiones complejas que influyen directamente en la tasa de reducción de GEI y el suministro de energía demandada a los consumidores [87]. Es un indicador cuantitativo.

La literatura muestra heterogeneidad en el nivel de definición: mientras en las dimensiones social, económica y ambiental se hallan descripciones más explícitas, en las dimensiones institucional, técnica y política la definición de criterios e indicadores es menos uniforme. Este vacío limita la comparabilidad entre estudios y justifica la necesidad de desarrollar marcos metodológicos más robustos y adaptados al contexto

1.4.4 Métodos de evaluación para la sostenibilidad energética

La literatura especializada presenta una amplia variedad de métodos y herramientas de evaluación de sostenibilidad. La diferencia principal radica en que los métodos son enfoques analíticos que permiten cuantificar impactos, costos o desempeños de un sistema, mientras que las herramientas constituyen instrumentos que facilitan la integración y comparación de la información generada por esos métodos en procesos de decisión.

- Métodos de Evaluación de Sostenibilidad

Entre los más relevantes se encuentran:

- Métodos del Ciclo de Vida: Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que cuantifica impactos ambientales “de la cuna a la tumba” [88], [89]; Costo del Ciclo de Vida (LCC), que evalúa costos y beneficios de inversión, operación, mantenimiento y fin de vida [90], [91]; Análisis de Ciclo de Vida Ambiental (E-LCA), reconocido como estándar internacional [91], [92]; y Evaluación Social del Ciclo de Vida (S-LCA), que aproxima efectos sobre partes interesadas aunque enfrenta limitaciones de datos y metodología [91], [92]. La integración de estos métodos en el *Life Cycle Sustainability Assessment* (LCSA) proporciona una base métrica coherente para contrastar alternativas en términos ambientales, económicos y sociales [93], [94].

- Métodos de frontera de eficiencia: el Análisis Envolvente de Datos (DEA) [95] y *Stochastic Frontier Analysis* (SFA), que comparan ecoeficiencia relativa entre tecnologías o regiones, asumiendo funciones de producción y eficiencia [96].
 - Métodos Termodinámicos: contienen el análisis exergético que permite evaluar la eficiencia y la destrucción de exergía, así como la calidad de la energía y el agotamiento de recursos energéticos y no energéticos, y la emergía que mide el trabajo útil incorporado en recursos y procesos [97], [98]
 - Otros métodos: existen métodos como la evaluación de la calidad total (TQA) o la Demanda energética acumulada (CED) usados en el sector de la construcción y tienen un impacto significativo en las mediciones [99], así como los enfoques de huella de carbono, agua, material y ecológica. También existen modelos input-output ambientales (EEIO/MRIO) permiten capturar impactos indirectos y de cadena de suministro, relevantes cuando las decisiones locales arrastran flujos globales de materiales y energía [100].
- Herramientas de Evaluación de Sostenibilidad

Entre las más empleadas se destacan las siguientes:

- Indicadores y estándares de reportes entre los cuales pueden encontrar los ODS, GRI, el modelo EISD del OIEA, el modelo WEC, el modelo IEA y la norma ISO 14001 [106], [133], [134]
- Herramientas multicriterio (MCDA): en la literatura, los enfoques MCDA ocupan un lugar particular. Por un lado, son reconocidos como métodos de evaluación porque permiten ordenar, clasificar o seleccionar alternativas energéticas en función de múltiples criterios (ej. AHP, ANP, MAUT/MAVT, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE, PROMETHEE). Por otro lado, muchos autores los utilizan como herramientas de integración, es decir, como mecanismos de agregación de información heterogénea que complementan otros métodos cuantitativos (como ACV o DEA). En contextos con alta incertidumbre o juicios lingüísticos, se emplean además extensiones difusas y técnicas de ponderación objetiva o mixta. Aunque el MCDA ha sido criticado por simplificar los impactos al promediarlos, sigue siendo una de las herramientas más utilizadas por su flexibilidad y capacidad de integración [25], [69].

- Instrumentos de políticas y regulación: entre estos pueden mencionarse la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), la Evaluación de Impacto Social o los análisis económicos, que ofrecen una base normativa y de gobernanza para la sostenibilidad [101].

La evaluación de la sostenibilidad en el sector energético constituye un desafío complejo que requiere integrar métodos que cuantifican impactos con herramientas que permitan su interpretación y uso en la toma de decisiones. La literatura confirma que no existe un único método capaz de abarcar todas las dimensiones de la sostenibilidad y que para lograr la robustez es necesaria la combinación de enfoques complementarios, apoyados en marcos de referencia reconocidos (GRI, ODS, OIEA, IEA) y bajo esquemas de gobernanza participativa y trazabilidad de datos. Dentro de este panorama, los métodos multicriterio (MCDA) destacan como el puente más utilizado entre métodos y la toma de decisiones, y constituyen la base sobre la cual este estudio seleccionará el enfoque de evaluación más adecuado para el caso de Leticia.

En conclusión, este capítulo ha establecido el marco contextual y teórico de la investigación. Partiendo de un panorama global de transición energética desigual, se ha aterrizado en la compleja realidad de las Zonas No Interconectadas de Colombia, culminando en el caso específico de Leticia, una capital departamental aislada y dependiente de combustibles fósiles. El análisis conceptual ha revelado que, si bien existen múltiples dimensiones y métodos para evaluar la sostenibilidad, persiste una falta de marcos estandarizados y adaptados a contextos remotos. Este escenario de desafíos logísticos y vacíos metodológicos sienta las bases para el siguiente capítulo, que se centrará en plantear de manera precisa el problema de investigación y los objetivos que guiarán este estudio.

2 Planteamiento del problema y estudio de caso

El capítulo anterior estableció el complejo panorama energético del municipio de Leticia, destacando su aislamiento geográfico, su dependencia de un costoso y contaminante suministro de diésel y la urgente necesidad de explorar alternativas sostenibles en un ecosistema de vital importancia global. Sobre esta base, este capítulo se dedica a formalizar dicha problemática. Se delimitará con precisión el problema de investigación, se justificará la relevancia académica y práctica del estudio, se establecerán los objetivos que guiarán el trabajo y, finalmente, se delinearé la hoja de ruta metodológica que se seguirá para responder a la pregunta central de esta tesis.

2.1 Problema de investigación

Con el compromiso de reducir las emisiones de GEI y disminuir los efectos negativos del cambio climático, los países han apostado por la aplicación de sistemas energéticos que sean más sostenibles y ambientalmente responsables. Esto, con ocasión del constante incremento en la temperatura a nivel global y regional. Por ejemplo, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en 2023 Latinoamérica presentó los niveles más altos de calor registrados en tres décadas. En consecuencia, los países están desarrollando planes nacionales enfocados en disminuir las emisiones, brindando calidad de vida a sus habitantes [102].

Colombia, por su parte, dentro del Plan Nacional de Desarrollo (PND) se comprometió a incorporar 2.000 MW de capacidad de generación eléctrica a partir de fuentes no convencionales, en el marco de una ruta de transición energética que impulsa la incorporación de fuentes de energías renovables en la matriz de generación y la respectiva disposición de infraestructura y tecnología avanzada en el sistema energético. Para esto se definieron las comunidades energéticas, con el propósito de que las comunidades locales participen en la prestación del servicio de energía a través de la autogeneración, los recursos energéticos distribuidos y la participación de la demanda, y se habilitó la financiación a través de los fondos con los que cuenta actualmente el sector (programa de normalización de redes y fondo de energía social) para el desarrollo de soluciones energéticas que usen fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) [103], [104].

El departamento del Amazonas, y en particular su capital, Leticia, enfrentan retos significativos en términos de sostenibilidad energética. La crisis climática ha exacerbado las condiciones ambientales de la región, provocando sequías extremas en máximos históricos en el río Amazonas que afectan no solo la biodiversidad, sino también la movilidad y acceso a bienes esenciales, incluyendo el combustible para la generación eléctrica [102], [105], [106]. El modelo actual basado en diésel no solo emite gases de efecto invernadero, sino que también implica un elevado costo, riesgos en su transporte y almacenamiento, y un impacto negativo en la calidad de vida de la población por la contaminación acústica.

En Leticia la conectividad eléctrica se ve obstaculizada por la inviabilidad de la interconexión, que podría dañar los frágiles ecosistemas locales. Por tanto, al igual que muchas zonas aisladas su único medio de energía eléctrica es a partir del diésel. Este combustible se transporta principalmente a Leticia desde Puerto Asís (putumayo), siguiendo el curso de los ríos Putumayo o Iça en Brasil y ascendiendo el Río Solimões. Este viaje en remolcador, que toma de 20 a 25 días, enfrenta desafíos significativos, como la autorización limitada para acceder a afluentes brasileños y las demoras debido a cambios climáticos y sequías [58].

Esta situación hace imperativo explorar nuevas fuentes de energía o combinar matrices energéticas. Esta necesidad urgente abre la puerta a las siguientes preguntas: ¿Cómo escoger las fuentes eléctricas técnicamente viables para Leticia y sus pobladores? ¿Cómo evaluar la sostenibilidad ambiental de estas fuentes energéticas? ¿Hasta qué punto los proyectos de electrificación rural basados en energías renovables fuera de la red existentes son sostenibles y qué factores explican su perdurabilidad?

En síntesis, la pregunta de investigación que motiva el presente trabajo es: ¿Cuáles son las fuentes energéticas más sostenibles para el suministro de energía en el Municipio de Leticia, Amazonas? Responderla requiere el planteamiento de soluciones innovadoras y sostenibles para el suministro de energía en Leticia y regiones similares.

2.2 Justificación

Leticia no está conectada a la red nacional, se encuentra a 1085 km de la capital del país, y su suministro de energía eléctrica depende completamente del diésel que se quema en plantas de combustión. A pesar de estas problemáticas, no se han implementado políticas públicas que aborden eficazmente las condiciones de abastecimiento eléctrico, o promuevan la implementación de sistemas de tecnologías limpias para mitigar los daños ambientales actuales. Por ello, esta investigación busca evaluar la sostenibilidad de las energías alternativas que podrían implementarse en la ciudad de Leticia-Amazonas. El propósito último de esta investigación es generar información que pueda ser utilizada para la planeación y transición energética con miras a cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible.

Ahora bien, dado que no existen estudios actuales centrados en mejorar las fuentes de energía para esta región del país que se consagra como el pulmón del mundo, se justifica la conveniencia de realizar esta investigación en la región y proporcionar una perspectiva de energías alternativas viables y sostenibles, por la ausencia de análisis recientes centrados en mejorar las fuentes de energía para una región de vital importancia global

como es el Amazonas. Además, el compromiso manifiesto en las recientes reuniones de mandatarios de estado de Brasil y Colombia, respecto al suministro de energía en esta zona hace imperativo abordar la cuestión desde una base técnica y científica.

2.3 Objetivos

2.3.1 General

Evaluar la sostenibilidad de las alternativas para el suministro de energía eléctrica que puedan implementarse en el Municipio de Leticia, Amazonas.

2.3.2 Específicos

- Identificar las alternativas técnicamente viables para el suministro de energía eléctrica en el Municipio de Leticia, Amazonas.
- Seleccionar la metodología adecuada para la evaluación de sostenibilidad de las alternativas identificadas para el suministro de energía eléctrica en el Municipio de Leticia, Amazonas.
- Evaluar la sostenibilidad de las alternativas identificadas para el suministro de energía eléctrica en el municipio de Leticia. Amazonas, empleando la metodología seleccionada.

2.4 Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados, la investigación se desarrollará siguiendo cinco fases metodológicas:

En la primera fase, se realizará una revisión sistemática y complementaria de literatura de los últimos veinte años (2004–2024) para identificar las brechas conceptuales en la

evaluación de sostenibilidad energética y para recopilar un banco preliminar de tecnologías, principios, criterios e indicadores pertinentes para Zonas No Interconectadas.

En la segunda fase, se seleccionará y justificará el método de evaluación de sostenibilidad y la viabilidad de las tecnologías más apropiadas para el caso de estudio (ej. LCSA, MCDA, etc.), Como respuesta a las brechas identificadas, se propondrá un modelo de evaluación conceptual de carácter jerárquico (D-P-C-I). Simultáneamente, se analizará la viabilidad técnica de las fuentes de energía, aplicando un filtro sistemático para definir y cuantificar el potencial de las alternativas factibles para el municipio de Leticia.

En la tercera fase se incluirá la participación Local y Construcción del Marco de Evaluación. Para esto se aplicará una encuesta a actores clave de Leticia para validar y seleccionar los principios de sostenibilidad que conformarán el núcleo del modelo. El análisis de los resultados de esta consulta será el que defina la estructura de cinco dimensiones (Ambiental, Social, Económica, Tecnológica y Política). Con base en los principios ya validados por la comunidad, se seleccionarán y operacionalizarán los criterios e indicadores finales. La encuesta también servirá para obtener los pesos de cada dimensión.

En la cuarta fase, se realizará la selección del Método de Evaluación Multicriterio. Habiendo construido el marco de evaluación completo y ponderado, se seleccionará y justificará el método y la herramienta más apropiados para resolver el problema.

Finalmente, en la quinta fase se aplicará el método seleccionado (ej. análisis multicriterio) para evaluar y comparar las alternativas a los datos recopilados y obtener un ranking de sostenibilidad de las alternativas energéticas, respondiendo así a la pregunta de investigación

3 Marco Metodológico y Diseño de la Investigación.

Este capítulo tiene como objetivo construir y detallar el marco metodológico diseñado para la evaluación de sostenibilidad energética en el Municipio de Leticia. Partiendo de una revisión sistemática del estado del arte, se define un método de evaluación conceptualmente robusto y adaptado al contexto Amazónico. Se establece la viabilidad Técnica de las alternativas energéticas, se incorpora la participación de actores locales para legitimar y ponderar las dimensiones de la sostenibilidad, y se operacionaliza la estructura completa de principios, criterios e indicadores. Finalmente, se selecciona y justifica el método de análisis que se utilizará para procesar los datos, dejando todo preparado para la aplicación del modelo en el capítulo siguiente.

3.1 Revisión Bibliográfica y Diagnóstico Conceptual

3.1.1 Estrategia de búsqueda y selección de fuentes.

Para establecer el estado del arte en las temáticas de evaluación de la sostenibilidad energética y sus tecnologías, se realizó una búsqueda sistemática en la base de datos Scopus. Se utilizó el operador Booleano “And”, combinando las palabras clave: “Evaluación de Sostenibilidad” (*Sustainability Assessment*), “Sostenibilidad” (*Sustainability*), electricidad fuera de la red (*electricity off grid*) y “Energía eléctrica” (*Electric Energy*). Para refinar los resultados de esta primera búsqueda, se aplicaron filtros por subárea de conocimiento (ej: energía, ciencias de la decisión) y se definió el periodo de publicación desde 2004 hasta 2024. Este proceso redujo el conjunto inicial, orientando la búsqueda principalmente a

modelos de evaluación para sistemas energéticos en zonas no interconectadas, estudios de sostenibilidad aplicados, y casos con condiciones similares a las de Leticia.

Para complementar la búsqueda sistemática y enriquecer el análisis, se realizó una búsqueda paralela y no estructurada, la cual fue fundamental para contextualizar los hallazgos en dos áreas clave: la identificación de alternativas energéticas pertinentes y, de manera crucial, la definición de los principios de sostenibilidad, un área conceptualmente débil en la literatura indexada en SCOPUS para el contexto de estudio. Este proceso incluyó la consulta de literatura gris, abarcando tanto informes técnicos de entidades colombianas (UPME, IPSE, IDEAM) como documentos de la ONU y marcos teóricos sobre economía circular y química verde. Estas fuentes fueron indispensables para comprender, adaptar y formular los principios que estructuran el modelo de evaluación de este trabajo. Por lo tanto, la información obtenida de esta búsqueda complementaria no solo nutrió los capítulos de antecedentes y viabilidad técnica, sino que constituyó la base conceptual para la construcción de todo el marco evaluativo.

3.1.2 Resultados clave de la revisión bibliográfica

La primera búsqueda en Scopus arrojó un total de 253 documentos, que posteriormente se redujo a 170 y a 84, luego de los dos primeros filtros de refinación descritos en la sección anterior. Tras este proceso de exclusión basado en la pertinencia temática y la revisión de resúmenes, se obtuvo una muestra final de 49 artículos, los cuales fueron analizados con dos herramientas: VOSviewer (v1.6.20) para construir y visualizar la red de coocurrencia de palabras clave, y R Studio para analizar la evolución temática.

La Figura 3-1 muestra la red de coocurrencia de palabras clave. En ella, destacan como ejes centrales de investigación el desarrollo sostenible, la generación de electricidad y la evaluación de la sostenibilidad, representados por nodos de gran tamaño y con fuertes conexiones entre tres clústeres o comunidades temáticas principales: métodos de evaluación (rojo) (ej: LCA/LCC, MCDA); política y territorio (verde) (ej: *energy policy*, *rural areas*); y tecnologías/servicios (ej: *renewable energies*, *electric utilities*). Se aprecia que la

menor densidad y centralidad del nodo “*rural electrification*” indica que, pese a la madurez conceptual general, su aplicación integrada a contextos off-grid (fuera de la red) es menos desarrollada.

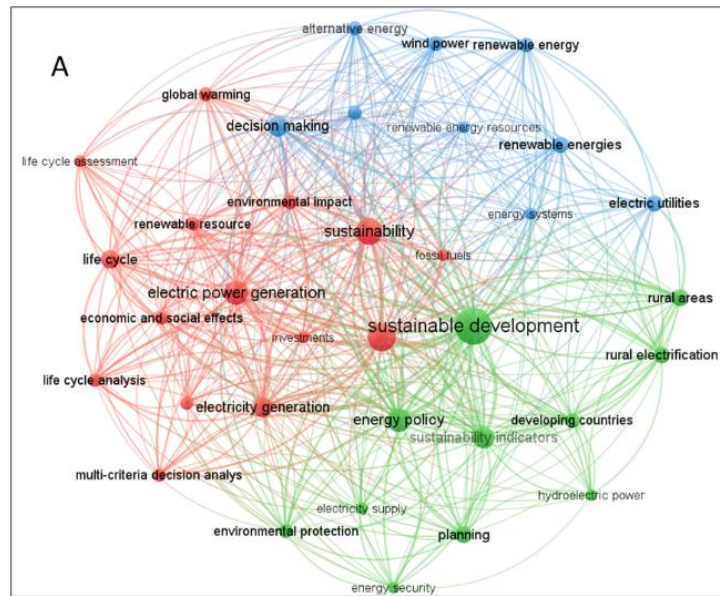


Figura 3-1. Red de coocurrencias de palabras clave

Por su parte, la figura 3-2, presenta la evolución temporal de los temas, desde tópicos tecnológicos e ingenieriles, hacia marcos generales. Si bien "desarrollo sostenible" es una constante, el interés por la "sostenibilidad" crece rápidamente desde 2020. En cambio, se evidencia un rezago en la investigación sobre "electrificación rural" a partir de 2015. Esto sugiere que los ejes de investigación se han centrado más en el concepto general de sostenibilidad que en su aplicación a contextos específicos fuera de la red.

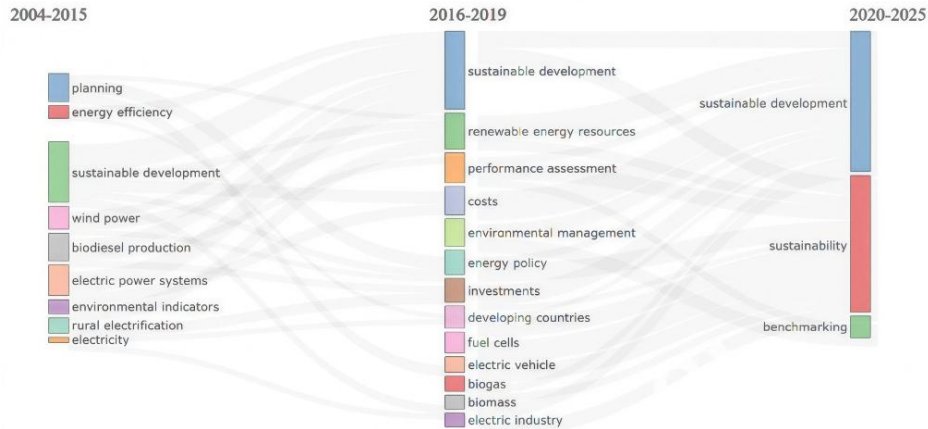


Figura 3-2. Evolución temática 2004 - 2024.

Finalmente se puede deducir que el análisis conjunto de las redes de coocurrencia y la evolución temática en esos 20 años permite identificar un claro vacío en la literatura. A pesar de la madurez de la investigación en sostenibilidad, su aplicación directa y sistemática a la evaluación de proyectos de electrificación en zonas fuera de la red sigue siendo un área con menor desarrollo y atención académica. La literatura privilegia el marco general frente a su aterrizaje sistemático en contextos off-grid, lo que refuerza la pertinencia de un modelo contextualizado para Leticia

Además del análisis bibliométrico, la revisión sistemática arrojó tres resultados que son insumos fundamentales para la construcción del modelo de evaluación:

- Se identificaron las tecnologías energéticas más estudiadas en la literatura no estructurada y la de Scopus para Zonas No Interconectadas, entre las que destacan la solar fotovoltaica, la Microhidráulica y diversas formas de aprovechamiento de biomasa. Este hallazgo valida la selección de alternativas que se analizarán en la sección de viabilidad técnica.
- Se recopiló un extenso repertorio inicial de más de 200 indicadores de sostenibilidad utilizados en estudios previos. Se constató que, en su mayoría, estos se presentaban de forma dispersa y sin un anclaje teórico explícito, lo que confirmó la necesidad de un proceso de depuración y estructuración posterior (ver Anexo A el listado completo).
- La revisión sistemática confirmó la debilidad conceptual mencionada en la metodología: la literatura indexada en Scopus raramente articula sus evaluaciones

a partir de principios de sostenibilidad explícitos, lo que justifica la necesidad de recurrir a la literatura gris y otros marcos teóricos para construir la base del modelo. El listado completo de principios recopilados de estas fuentes, que sirvió como inventario para la posterior selección, se presenta en el Anexo B.

3.1.3 Hallazgos clave y brechas identificadas

El análisis conjunto de la revisión bibliográfica revela tres brechas fundamentales que esta tesis busca abordar:

- La mayoría de los estudios evalúan proyectos ya existentes, limitándose a datos operacionales y no explorando el potencial de nuevas soluciones desde su concepción.
- Pocos trabajos anclan su metodología en los principios de la sostenibilidad (ej. equidad, integridad ecológica). La práctica común es adoptar indicadores de otros autores sin un proceso reflexivo que responda a las particularidades del contexto.
- Existe una desconexión entre la madurez de la investigación en sostenibilidad y su aplicación a proyectos de electrificación en zonas fuera de la red.

3.1.4 Respuesta a las brechas: contribución y enfoque del estudio

Para abordar las brechas fundamentales identificadas, el presente trabajo propone una contribución estructurada en dos ejes principales que definen su enfoque metodológico:

- Desarrollar un modelo de evaluación de sostenibilidad fundamentado, como respuesta a la debilidad conceptual detectada, este modelo no partirá de dimensiones o indicadores predefinidos, sino de los principios fundamentales de la sostenibilidad. A partir de ellos, se derivarán de manera jerárquica las dimensiones, criterios e indicadores específicos que aseguren una cobertura integral y que sean

directamente relevantes para el contexto de Zonas No Interconectadas (ZNI) en la Amazonía.

- Aplicar y validar este modelo en un caso de estudio local para atender el enfoque retrospectivo y el vacío de aplicación, se realizará un análisis prospectivo en Leticia (Colombia). Esta aplicación constituye el primer estudio de sostenibilidad para la generación de energía en la región basado en el potencial de recursos locales. El modelo se utilizará para evaluar y comparar, mediante un análisis multicriterio, diferentes alternativas tecnológicas. Un elemento diferenciador clave será la incorporación de la percepción y las prioridades de la comunidad local en la ponderación de los indicadores.

De este modo, la investigación no solo llena un vacío teórico en la literatura, sino que también ofrece una herramienta práctica y contextualizada para la toma de decisiones en la planificación energética de regiones remotas y ecosistémicamente sensibles. Esta aproximación metodológica se detalla a continuación.

3.2 Arquitectura del Modelo Conceptual de Evaluación (D-P-C-I)

Como respuesta directa a la debilidad conceptual y la falta de un anclaje teórico detectadas en la revisión bibliográfica, se hace indispensable la construcción de un nuevo marco de evaluación. En el contexto de esta tesis, dicho marco se denominará "modelo conceptual de evaluación", entendiéndose este no como un fin en sí mismo, sino como el instrumento metodológico diseñado para cumplir con el segundo y tercer objetivo específico. La principal innovación de este modelo reside en su estructura conceptual jerárquica. Este enfoque se aleja de la práctica común de adoptar listas de indicadores predefinidos y, en su lugar, propone un sistema lógicamente deducido que garantiza que la evaluación esté anclada desde su origen en los fundamentos de la sostenibilidad. La arquitectura del modelo se organiza en cuatro niveles interconectados: Dimensiones, Principios, Criterios e Indicadores (D-P-C-I).

Esta estructura D-P-C-I proporciona un marco robusto y transparente. Las siguientes secciones de este capítulo detallarán el proceso seguido para definir los componentes de cada nivel de esta jerarquía, validar su pertinencia para el caso de Leticia y ponderar su importancia relativa.

3.3 Análisis de viabilidad y selección de alternativas energéticas.

Antes de realizar la evaluación de sostenibilidad, es imprescindible establecer la viabilidad técnica y el potencial de generación de las alternativas energéticas consideradas para el municipio de Leticia. La pertinencia de cada fuente depende no solo de su reconocimiento en la literatura, sino de su capacidad real para generar energía bajo las condiciones climáticas, ambientales y logísticas propias de la Amazonía colombiana. Por ello, la selección de estas alternativas no fue arbitraria, sino el resultado de un proceso de filtrado sistemático, cuyo desarrollo se explica a continuación y se resume visualmente en la Figura 3-3.

3.3.1 Proceso para la Selección de Alternativas

El proceso para definir las alternativas a evaluar consistió en tres etapas metodológicas:

- Identificación de las fuentes de energía, partiendo de las tecnologías energéticas identificadas en la revisión bibliográfica.
- Aplicación de un filtro riguroso de viabilidad técnica para determinar cuales alternativas eran factibles en el contexto específico de Leticia. Este filtro evaluó cada tecnología con base en los siguientes ejes:
 - Potencial Tecnológico y Disponibilidad de Recursos Locales: Se analizó si la tecnología era madura para aplicaciones fuera de la red y, crucialmente, si existía un recurso local suficiente y comprobable (irradiación solar, caudal

hídrico, flujos de residuos) para sostener una generación energética significativa.

- Impacto Social y Aceptación Comunitaria: Se consideró la percepción social preliminar y los potenciales impactos positivos o negativos sobre la comunidad, asegurando que las tecnologías preseleccionadas fueran socialmente viables.
- Marco Normativo y Ambiental: Se verificó la compatibilidad de cada tecnología con la normatividad ambiental vigente, especialmente relevante en un ecosistema sensible como la Amazonía
- Definición del conjunto final de Alternativas Tecnológicas que superaron satisfactoriamente el filtro de viabilidad técnica.

Este proceso de tres etapas conformó un conjunto final de cinco alternativas, garantizando un análisis académicamente informado y contextualmente relevante. Incluyendo la energía actualmente suministrada en Leticia.

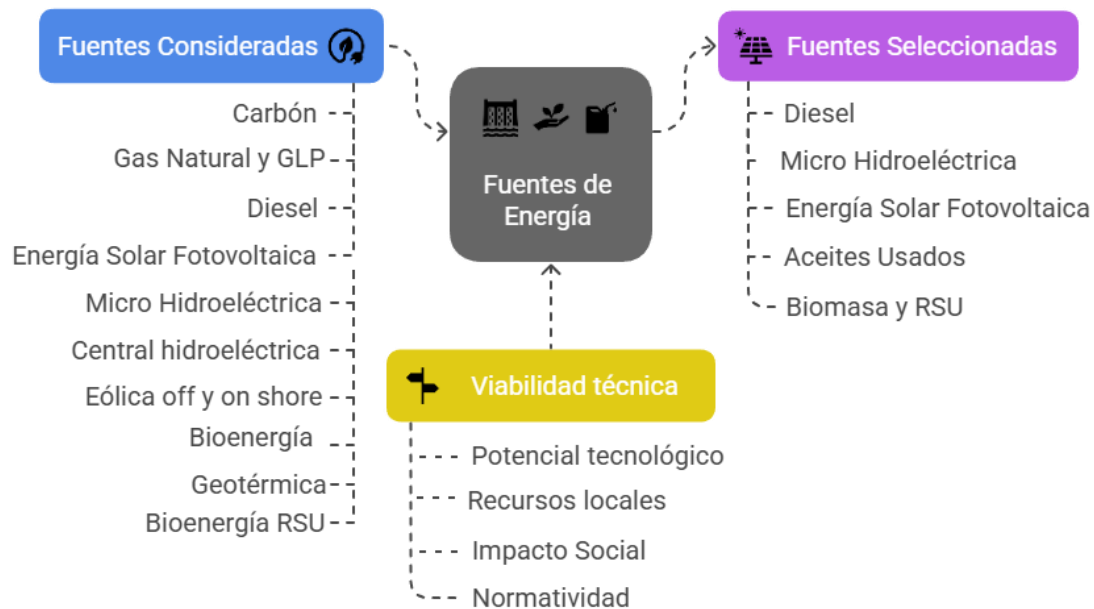


Figura 3-3. Proceso de Selección y Filtrado de Alternativas Tecnológicas

3.3.2 Potencial Estimado por Tecnología

A continuación, se detallan los parámetros técnicos y supuestos utilizados para calcular el potencial de generación de cada una de las alternativas seleccionadas:

- **Energía Solar Fotovoltaica:** La radiación solar en Leticia presenta condiciones favorables para la generación fotovoltaica. Datos horarios de irradiación suministrados por el IDEAM y la UPME [107] para el periodo 2018–2022 indican una irradiancia promedio de 4,62 kWh/m²/día y un rango útil de 4,5 horas solares efectivas. Con una eficiencia de paneles del 19% y la superficie de instalación acorde a la demanda a cubrir. Con estos parámetros el potencial anual de generación solar se calcula en 12,5 GWh/año, equivalente a cubrir aproximadamente el 70,2% de la demanda eléctrica de Leticia.
- **Energía a partir de RSU:** El municipio de Leticia genera entre 29 y 30 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, dispuestos en el relleno sanitario El Jaguar. Con un poder calorífico inferior (PCI) de 7.781 kJ/kg [108] y considerando un aprovechamiento energético del 30% del total debido a la ausencia de separación, la tecnología más adecuada es la incineración controlada. El potencial estimado de generación a partir de RSU es de 5,72 GWh/año, lo que corresponde a un 32,1% de la demanda anual.
- **Energía hidroeléctrica en pequeña escala:** Los registros del IDEAM (Estación 48017030) muestran un caudal promedio anual del río Amazonas superior a 1.500 m³/s, con gran estabilidad interanual. Para un escenario conservador, se considera la derivación del 5% del caudal (50 m³/s) y una altura neta de caída de 4 m, coherente con microcentrales de pasada para este sector según el IDEAM y la UPME. Bajo estas condiciones, el potencial hidroeléctrico se estima en 8,26 GWh/año, lo que representa cerca del 46,4% de la demanda eléctrica anual.
- **Energía Diesel:** El sistema eléctrico de Leticia depende en la actualidad de plantas diésel con una capacidad instalada de 17,8 GWh/año, equivalente a cubrir el 100% de la demanda eléctrica local. No obstante, su operación implica altos costos de transporte y mantenimiento, baja eficiencia relativa y graves impactos ambientales. Por esta razón, el diésel se considera en este estudio como una fuente de referencia y de respaldo transicional en un posible esquema híbrido.
- **Aceites Usados de Cocina:** El aprovechamiento de aceites de cocina usados (ACU) constituye una opción emergente con beneficios ambientales y sociales. A partir de la literatura, se estima que cada habitante genera alrededor de 0,035 L/día de ACU, con un poder calorífico comparable al diésel. Para Leticia, esto representa un potencial de 1,77 GWh/año, suficiente para cubrir el 9,9% de la demanda. Aunque

su escala es reducida, su valor radica en la reducción de impactos ambientales locales y en la participación ciudadana en esquemas de economía circular.

3.3.3 Síntesis de Resultados del Análisis Técnico

La demanda energética anual de Leticia, calculada a partir de datos del IPSE y el DANE [109], se estima en 17.8 GWh La Tabla 3-1 sintetiza los potenciales energéticos anuales para cada fuente viable, calculados a partir de los parámetros anteriormente descritos y su contribución porcentual a la cobertura de dicha demanda.

Tabla 3-1. Potencial energético anual por fuente

Fuente de Energía	Potencial Energético (GWh/año)	% de Cobertura de Demanda Anual
Solar	12.5	70.22%
Hidro	8.26	46.4%
RSU	5.72	32.1%
ACU	1.77	9.94%
Diésel	17.8	100%

Los resultados del análisis técnico son concluyentes: Leticia posee un notable potencial en diversas fuentes de energía renovable, con la solar y la hidroeléctrica destacando por su capacidad para cubrir una porción significativa de la demanda. Sin embargo, la viabilidad técnica es solo la primera condición de la sostenibilidad. Un análisis puramente técnico no puede responder cuál alternativa es más equitativa, socialmente aceptada o políticamente coherente. Para responder a estas preguntas y construir un marco de evaluación verdaderamente integral, es indispensable pasar de la cuantificación del potencial a la incorporación de la perspectiva local, tal como se detalla en la siguiente sección.

3.4 Proceso de consulta local mediante encuesta y asignación de pesos al modelo.

Habiendo establecido la viabilidad técnica de las alternativas, esta sección diseña, presenta y aplica una encuesta estructurada con actores clave de Leticia para operacionalizar la perspectiva local en el modelo de evaluación. Ya que un modelo de evaluación, por muy robusto que sea técnicamente, carece de pertinencia si no refleja los valores y prioridades de la comunidad a la que busca servir. En este caso la finalidad de la encuesta es doble, validar la estructura conceptual (dimensiones y principios) derivada de la revisión bibliográfica y de la literatura gris y ponderar la importancia relativa de cada dimensión y principio, de modo que el ranking final refleje las prioridades del territorio.

La encuesta se construye directamente a partir de los hallazgos previos y se aplica en esta sección a una muestra intencional de actores de los sectores gubernamentales, indígena, empresarial, comunitario, académico y de la empresa de energía local. Los resultados de la aplicación se reportan mas adelante en las subsecciones correspondientes.

3.4.1 Preparación de la consulta: estructuración de principios y dimensiones.

Dado el vacío conceptual identificado en la revisión sistemática, fue necesario recurrir a la búsqueda en literatura gris y marcos teóricos alternativos (ONU, repositorios, química verde, economía circular) para construir una base sólida de principios. Este proceso resultó en la consolidación de un listado exhaustivo de 100 principios (ver Anexo B para el listado completo).

De este listado exhaustivo, se seleccionó un conjunto inicial de 16 principios para ser presentados en una encuesta. El proceso de selección se basó en la pertinencia de cada principio para Zonas No Interconectadas, su claridad conceptual y su potencial para ser comprendido y evaluado por los diversos actores locales. Fue precisamente este análisis de agrupación el que reveló que el enfoque tripartito tradicional (ambiental, social y económico) era insuficiente para categorizar de manera coherente la totalidad de los principios seleccionados. Específicamente, principios relacionados con la gobernanza, la fiabilidad operativa y la adaptabilidad no encajaban adecuadamente, lo que confirmó la

necesidad de operar bajo las dimensiones Política y Tecnológica para dar cuenta de las problemáticas particulares de las Zonas No Interconectadas. En consecuencia, la lista que constituyó el instrumento exacto para la consulta, se presenta en detalle en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Principios de Sostenibilidad presentados en la encuesta.

#	Dimensiones	Principio	Definición
1	Ambiental	Prevención de residuos y contaminación	Minimizar las emisiones atmosféricas contaminantes resultantes de la producción de energía, así como priorizar la reducción de residuos mediante estrategias de mitigación y tecnologías limpias.
2		Minimización del Impacto sobre la biodiversidad	Proteger los ecosistemas locales asegurando que la infraestructura energética, no degrade el hábitat de especies vulnerables
3		Uso sostenible de los recursos Naturales	Garantizar que los recursos utilizados para la generación de energía sean renovables o gestionados de manera sostenible.
4	Social	Participación comunitaria e inclusión	Incluir a las comunidades locales, cabildos indígenas y grupos de interés en la planificación y toma de decisiones sobre fuentes energéticas sostenibles para la región.
5		Accesibilidad y equidad en el suministro de energía eléctrica	Asegurar que la generación de energía de distintas fuentes sea accesible a todos los sectores de la población, especialmente a comunidades vulnerables
6		Innovación y desarrollo tecnológico	Fomentar la investigación y adopción de nuevas tecnologías energéticas adaptadas a la región, incluyendo procesos de conversión de RSU y aceites usados en energía
7		Respeto a la cultura y tradiciones locales	Incorporar conocimientos ancestrales y cosmovisiones indígenas en la aprobación de fuentes energéticas y su impacto en la vida cotidiana de las culturas.
8	Económica	Viabilidad económica y sostenibilidad financiera	Asegurar que las soluciones energéticas sean económicamente viables y generen estabilidad financiera a largo plazo
9		Generación de empleo y economía local	Fomentar la creación de empleos locales y el desarrollo de capacidades en tecnologías de energía sostenible, incluyendo gestión de residuos y biocombustibles.
10	Política	Alineación con políticas nacionales e internacionales	Cumplir con regulaciones y compromisos internacionales sobre energía y sostenibilidad en el uso de RSU, aceites usados, diésel y energías renovables.
11		Transparencia y gobernanza en la gestión energética	Garantizar procesos de toma de decisiones abiertos y participativos en la política energética local.

#	Dimensiones	Principio	Definición
12		Planificación a largo plazo	Desarrollar estrategias y políticas energéticas que garanticen la sostenibilidad del sistema energético en Leticia a futuro, considerando un mix de fuentes energéticas.
13	Tecnológica	Eficiencia y confiabilidad de las tecnologías energéticas	Garantizar que las tecnologías implementadas tengan un alto rendimiento y confiabilidad operativa, minimizando fallos y optimizando la generación.
14		Adaptabilidad a condiciones locales	Asegurar que las tecnologías sean adecuadas a las condiciones climáticas y geográficas de Leticia, maximizando su eficiencia en el entorno amazónico.
15		Viabilidad técnica y mantenimiento	Evaluar la facilidad de instalación, operación y mantenimiento de las tecnologías energéticas, asegurando disponibilidad de repuestos y mano de obra local.
16		Gestión de residuos energéticos	Implementar estrategias para el aprovechamiento de residuos como RSU y aceites usados, garantizando su conversión eficiente en energía con el menor impacto ambiental.

3.4.2 Proceso de consulta: instrumento, muestreo y participantes.

Con el fin de legitimar los principios de sostenibilidad y operacionalizar los criterios e indicadores, se diseñó una encuesta (ver anexo D) titulada “*Importancia de los Principios de Sostenibilidad en la Selección de Fuentes de Energía para Leticia y su Aceptación*”, la cual se estructuró en 3 secciones:

- Caracterización del participante: para identificar el sector de procedencia del encuestado.
- Valoración de Principios: donde se solicitó calificar la importancia de cada uno de los 16 principios de sostenibilidad utilizando una escala de Likert.
- Percepción de Tecnologías y Factores de Decisión: una sección de selección múltiple para sondear la aceptación de las fuentes de energía y los factores considerados más relevantes para la toma de decisiones

La encuesta fue distribuida y aplicada por medio de la plataforma Google Forms y estuvo dirigida a actores clave de sectores estratégicos (gubernamental, indígena, empresarial, comunitario, académico y Empresa de Energía - ENAM). La selección de los participantes

se realizó a través de un muestreo intencional no probabilístico, priorizando la participación de sectores estratégicos para la planificación energética del municipio. En total se recopilieron 21 respuestas válidas de actores clave y expertos locales. La Figura 3-4 muestra la distribución porcentual de participación por sector.

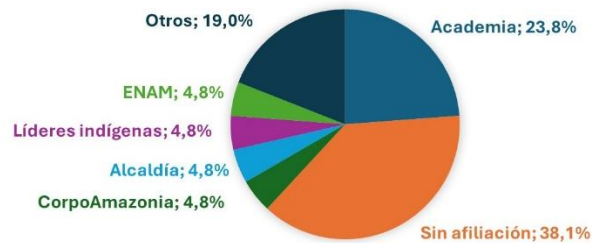


Figura 3-4 Distribución de Participantes en la Encuesta Por Sector.

3.4.3 Resultados y análisis de la consulta local

La aplicación de la encuesta a los actores clave del territorio arrojó resultados significativos que permitieron cumplir los objetivos metodológicos de esta fase: cuantificar las prioridades locales, validar la estructura del modelo y seleccionar los principios finales. A continuación, se presenta un análisis de los hallazgos clave.

- **Relevancia y Desafíos Percibidos:** Se encontró un consenso casi unánime sobre la relevancia del tema: el 95% de los participantes calificó la sostenibilidad como “muy importante” para elegir fuentes de energía. Los desafíos más urgentes percibidos por la comunidad son el costo de la energía, el impacto ambiental y la dependencia de combustibles fósiles, factores de decisión que serán tenidos en cuenta para la matriz de evaluación de las tecnologías. Se observa en la Figura 3-5, la necesidad de aplicar un enfoque multicriterio que equilibre estas distintas expectativas.



Figura 3-5. Factores de Decisión para la Selección de una fuente de Energía

- Jerarquización de Dimensiones: La valoración de los principios permitió jerarquizar la importancia relativa de las cinco dimensiones del modelo. En la figura 3-5 se observa una clara primacía de la dimensión Ambiental, seguida de la Tecnológica, Política, Económica y, por último, la Social. Esta jerarquía es coherente con la condición amazónica de Leticia (alta sensibilidad ecosistémica), la criticidad operativa en un sistema aislado (confiabilidad y logística) y la necesidad de marcos de gobernanza para habilitar cambios en el mix energético.

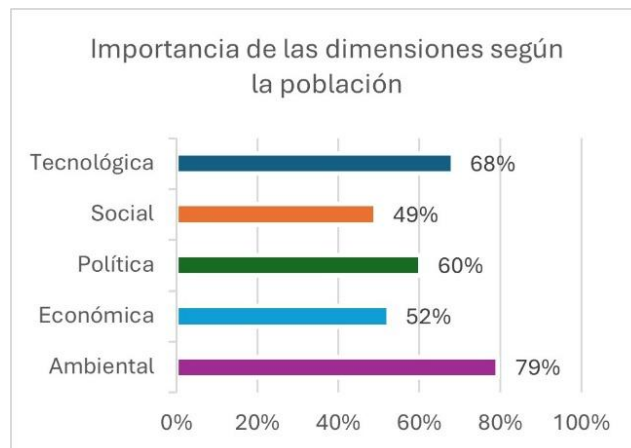


Figura 3-6 Porcentaje de importancia de las dimensiones según los actores locales

- Priorización por Principios: El análisis detallado de la valoración de cada principio revela las prioridades específicas dentro de cada dimensión. Los resultados detallados de esta valoración, que permitieron jerarquizar las dimensiones y seleccionar los principios finales, se presentan en la Tabla 3-3

Tabla 3-3. Importancia de los principios según los actores locales

Dimensión	Principio	Importancia de los Ppios
Ambiental	Minimizar emisiones y desechos	71%
	Protección de ecosistemas locales	86%
	Aprovechamiento responsable de recursos	81%
Social	Involucrar a la comunidad en decisiones energéticas	38%
	Energía asequible para todos	62%
	Considerar conocimientos ancestrales en la energía	48%
Económica	Costos razonables y estabilidad a largo plazo	57%
	Fomentar empleos en el sector energético sostenible	48%
Tecnológica	Alto rendimiento y estabilidad en la generación	57%
	Adecuación de tecnologías a Leticia	71%
	Uso de residuos de manera eficiente	76%
Política	Cumplimiento de normativas energéticas	48%
	Procesos abiertos y participativos	67%
	Estrategias energéticas para el futuro de Leticia	67%

El análisis de esta tabla revela una clara jerarquía de prioridades. Dentro de la dimensión Ambiental, la "Protección de ecosistemas locales" (86%) es, por un amplio margen, el principio más valorado, lo que refleja la alta conciencia ecológica del territorio. En la dimensión Tecnológica, el "Uso de residuos de manera eficiente" (76%) y la "Adecuación de tecnologías a Leticia" (71%) destacan, mostrando una preferencia por soluciones prácticas y contextualizadas. En contraste, principios como "Involucrar a la comunidad" (38%) o "Fomentar empleos" (48%) obtuvieron una valoración relativamente más baja, lo que no indica que no sean importantes, sino que, en una escala de prioridades, la protección ambiental y la viabilidad técnica son percibidas como más urgentes.

A partir de esta priorización, se seleccionaron los principios finales que obtuvieron mayor respaldo y que conforman el núcleo del marco de evaluación. La selección se basó en los principios con las puntuaciones más altas dentro de cada una de las cinco dimensiones, asegurando una representación equilibrada de las prioridades locales. La Tabla 3-4 presenta el conjunto final de principios validados por la comunidad.

Tabla 3-4. Principios Finales para la Evaluación de Sostenibilidad

Dimensión	Principio
Ambiental	Minimizar emisiones y desechos
	Protección de ecosistemas locales

Dimensión	Principio
	Aprovechamiento responsable de recursos
Social	Energía asequible para todos
Económica	Costos razonables y estabilidad a largo plazo
Tecnológica	Adecuación de tecnologías a Leticia
	Uso de residuos de manera eficiente
Política	Procesos abiertos y participativos
	Estrategias energéticas para el futuro de Leticia

- Percepción sobre tecnologías específicas: finalmente, se exploró la percepción de la población frente a las fuentes de energía. Como muestra la Figura 3-6, la energía solar fotovoltaica obtuvo el mayor nivel de aceptación, seguida por el aprovechamiento de residuos sólidos urbanos. Además, los participantes manifestaron la necesidad de replantear el modelo de concesión a una sola empresa y expresaron preocupaciones sobre el impacto ambiental y el costo de tecnologías como la termovalorización, recalcando la importancia de políticas claras sobre la disposición final de residuos.

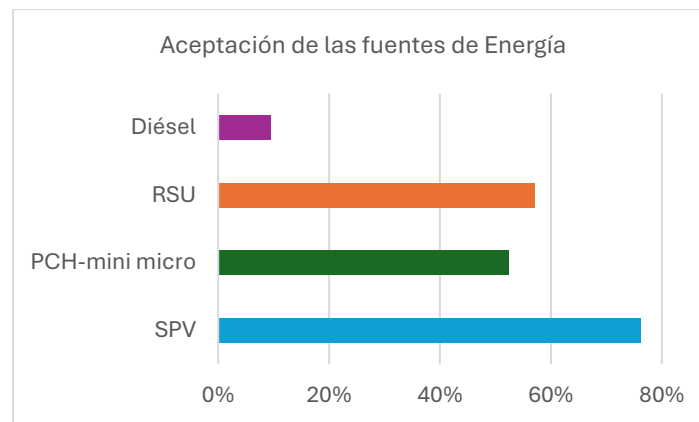


Figura 3-7. Aceptación de las fuentes de energía

3.4.4 Estructura final del marco de evaluación.

Una vez definidos los principios finales a través de la consulta local, estos se utilizaron como un marco rector para seleccionar, del amplio inventario recopilado en la revisión sistemática (ver Anexos A y C), los criterios e indicadores más pertinentes para el contexto de Leticia. Este proceso de selección garantizó que la estructura final no solo fuera conceptualmente coherente, sino que también estuviera alineada con las prioridades validadas por la

comunidad. La Tabla 3-5 presenta la estructura jerárquica consolidada que se empleará para la evaluación.

Tabla 3-5. Consolidación de la evaluación de Sostenibilidad

Dim	Principio	Criterios	Indicador ajustado
Ambiental	Minimizar emisiones y desechos	Nivel de Emisiones de gases de efecto invernadero	Emisiones de GEI
		Tipo de tecnología según impacto en emisiones	Generación de contaminante por tipo de fuente energética utilizada
	Protección de ecosistemas locales	Interferencia con áreas protegidas	áreas protegidas
		Impacto potencial sobre ecosistemas sensibles	Presencia de zonas de importancia ecológica
	Aprovechamiento responsable de recursos	Uso de recurso Hídricos	Consumo de agua
		Proporción de fuentes energéticas renovables	Participación de fuentes renovables
Social	Energía asequible para todos	Cobertura del servicio eléctrico	Proporción de población con acceso a electricidad
		Potencial de ampliación del servicio energético	Estimación de cobertura del sistema propuesto
		Nivel de aceptación social del sistema energético propuesto	Aceptación pública
Económica	Costos razonables y estabilidad a largo plazo	Costo total por unidad de energía generada	costo nivelado de la electricidad (LCOE)
		Costo de Operación y Mantenimiento anual	Costos de operación y mantenimiento
		Costo final proyectado por kWh	Precio de la generación de la electricidad
			costo unitario de electricidad (Precio por kWh)
Tecnológica	Adecuación de tecnologías a Leticia	Adaptabilidad tecnológica al entorno local	Adaptabilidad del sistema
		Facilidad de instalación y mantenimiento en contexto Amazónico	Requerimiento logístico y mantenimiento de la tecnología
	Uso de residuos de manera eficiente	Disponibilidad local de insumos o residuos aprovechables	Disponibilidad de combustibles
		Eficiencia operativa estimada del sistema	Factor de capacidad

Dim	Principio	Criterios	Indicador ajustado
Política	Procesos abiertos y participativos	Inclusión de mecanismos de participación social	Mecanismo de Implementación
		Proyección de programas de formación comunitaria	Capacitación y participación comunitaria
	Estrategias energéticas para el futuro de Leticia	Alineación con normativas energéticas nacionales	Conformidad con normas nacionales
		Riesgos asociados a insumos energéticos externos	Riesgo de suministro externo

3.5 Selección del Método de Análisis Final.

La evaluación de la sostenibilidad de sistemas energéticos es un problema inherentemente complejo. La decisión no puede basarse en un único factor, como el costo (Análisis económico) o la eficiencia (análisis técnico), sino que debe integrar múltiples dimensiones (Ambiental, social, tecnológica, política, entre otras), que a menudo presentan conflictos. Por ejemplo, la alternativa más económica puede no ser la más respetuosa con el medio ambiente, y la tecnológicamente más avanzada puede no tener la mayor aceptabilidad social, como es el caso del diésel en Leticia. Además, los indicadores que definen estas dimensiones se miden en unidades inconmensurables (GWh/año, USD/kWh, kg de CO₂, puntuaciones de 1 a 5 en una encuesta, etc.), lo que impide una comparación directa.

Para abordar este tipo de problemas, la literatura científica ha desarrollado herramientas como el Análisis de evaluación multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés). Estos métodos permiten comparar alternativas considerando simultáneamente distintos criterios, tanto cuantitativos como cualitativos, lo que los convierte en herramientas ampliamente utilizadas en estudios de sostenibilidad. Un enfoque MCDA es la herramienta adecuada para esta investigación porque permite:

- Estructurar el problema de decisión de forma jerárquica (dimensiones, criterios, indicadores).
- Integrar datos cuantitativos y cualitativos de naturaleza diversa.
- Incorporar las prioridades subjetivas de los actores locales a través de la asignación de pesos a los criterios.

- Evaluar las alternativas de forma transparente y sistemática para obtener un ranking de preferencia.

Entre la familia de métodos MCDA, existen numerosas herramientas como AHP, ANP, PROMETHEE, ELECTRE y TOPSIS. Cada una presenta características particulares, pero todas tienen en común su capacidad para estructurar problemas complejos, ponderar criterios y facilitar la toma de decisiones.

De las herramientas anteriormente mencionadas se optó por el método TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) debido a su solidez, flexibilidad y facilidad de interpretación en contextos donde se requiere identificar la alternativa más cercana a la solución ideal y alejada de la menos deseable [110]. TOPSIS permite establecer una comparación directa entre las alternativas mediante la construcción de una solución ideal positiva y una negativa, lo que proporciona resultados claros y comprensibles para la toma de decisiones. Además, su aplicación ha sido validada en numerosos estudios enfocados en la evaluación de sostenibilidad de sistemas energéticos, especialmente en contextos similares a los del municipio de Leticia, caracterizados por limitaciones de datos y la necesidad de integrar percepciones de diversos actores [69], [111].

El uso de TOPSIS responde a una decisión metodológica fundamentada, buscando un análisis robusto, transparente y adaptado a la naturaleza del problema. La aplicación de este método, siguiendo sus pasos estándar, se desarrollará en el siguiente

4 Aplicación del Modelo y Discusión de Resultados.

Este capítulo presenta la aplicación del marco metodológico desarrollado en el capítulo anterior al caso de estudio de esta tesis, la matriz energética más sostenible para el municipio de Leticia, Amazonas. El objetivo es tomar los componentes definidos del modelo D-P-C-I, las cinco alternativas y las ponderaciones locales, y procesarlos mediante el método TOPSIS para obtener una evaluación cuantitativa de la sostenibilidad de cada fuente.

El capítulo se estructura en tres partes. Primero, se detalla la construcción de la matriz de decisión, que consolida todos los datos técnicos, económicos, sociales, ambientales y políticos para cada alternativa energética. Segundo, se describe la aplicación paso a paso del método TOPSIS, incluyendo la normalización y ponderación de la matriz, hasta la obtención del ranking final. Finalmente, se presenta una discusión detallada de estos resultados, interpretando el desempeño de cada alternativa y analizando las implicaciones de los hallazgos para la planificación energética sostenible en el municipio de Leticia.

4.1 Construcción de la Matriz de decisión

La matriz de decisión es el insumo fundamental para el análisis multicriterio. Esta consolida el desempeño de cada una de las cinco alternativas energéticas frente a cada una de las dimensiones, principios, criterio e indicadores de sostenibilidad definidos en el marco de evaluación y que se consolidaron en la Tabla 3-5.

4.1.1 Recopilación y Sistematización de los datos

Para esta matriz se realizó una búsqueda en diversas fuentes para obtener los valores de cada uno de los indicadores de la tabla 3-5, garantizando una base de datos robusta y contextualizada. El origen de los datos usados para calcular los indicadores es el siguiente:

- Datos Tecnológicos y Ambientales: calculados a partir del análisis de potencial energético (Capítulo 3), factores de emisión del IPCC, fichas técnicas de tecnologías y literatura especializada.
- Datos Sociales y Políticos: obtenidos directamente de los resultados de la encuesta a actores locales (ej. Aceptación Pública).
- Datos Económicos: calculados a través de un análisis de costos específico para cada tecnología. En concreto, para obtener un indicador comparable del costo de cada tecnología a lo largo de su vida útil, se calculó el Costo Nivelado de la Electricidad (LCOE). El cálculo se realizó aplicando la fórmula recomendada por la IEA, que incluye los costos de inversión (CAPEX), los costos de operación y mantenimiento (OPEX), los costos de combustible (si aplica), la producción anual de energía y la vida útil de cada tecnología, considerando una tasa de descuento estándar del 6%

A continuación, se presentan las tablas de cada tipología de indicadores con sus respectivos datos. Estas tablas son los insumos a partir de los cuales se estructuró la matriz de decisión inicial, la cual será objeto de la aplicación paso a paso del método TOPSIS, con su respectiva normalización y ponderación.

4.1.1.1 Indicadores Ambientales

Tabla 4-1. Indicadores Ambientales

Tecn	Emisiones GEI Anual kg CO ₂ eq	Contaminantes kg/año					Áreas protegidas %	Consumo agua	% Renovables
		Nox	Sox	CO	PM	COV			
SFV	888003.94	-	-	-	-	-	-	1353.66	100
PCH	433172.66	-	-	-	-	-	0.0083	902.44	100

Tecn	Emisiones GEI Anual kg CO ₂ eq	Contaminantes kg/año					Áreas protegidas %	Consumo agua	% Renovables
		Nox	Sox	CO	PM	COV			
RSU	15341531.57	6317.10	2256.11	1804.89	541.47	1082.93	-	36097.72	-
ACU	15341531.57	46927.04	27073.29	2707.33	1804.89	721.95	-	13536.65	-
Diesel	15341531.57	50536.81	2707.33	11731.76	2346.35	1082.93	-	9024.43	-

4.1.1.2 Indicadores Sociales

Tabla 4-2. Indicadores Sociales

Alternativa	Cobertura actual (%)	Potencial ampliación (%)	Aceptación social (%)
SFV	1	100	76
PCH	0	33	52
RSU	0	33	57
ACU	0	33	0
Diesel	96.9	66	10

4.1.1.3 Indicadores Económicos

Tabla 4-3. Estimación del Costo Nivelado de la Electricidad de las Fuentes de Energía Evaluadas

Alternativa	Inversión inicial (CAPEX)	Costos de operación y mantenimiento anual (OPEX)	Costos de combustible (si aplica)	Producción anual de energía (MWh/año)	Vida útil estimada (años)	LCOE USD/kWh
SFV	\$7,810,177.39	\$102,160.93	0	18048.86	25	0.035
PCH	\$2,355,000.00	\$75,000.00	0	13760.50	25	0.019
RSU	\$4,231,441.71	\$2,955,733.17	0	6404.19	40	0.505
ACU	\$85,000.00	\$28,000.00	0	1.18939	50	28.076
Diesel	\$1,500,000.00	\$240,000.00	\$4,450,207	18048.86	50	0.265

4.1.1.4 Indicadores Tecnológicos

Tabla 4-4. Indicadores Tecnológicos

Alternativa	Adaptabilidad	Logística Mantenimiento	Disponibilidad combustibles	Factor capacidad (%)
SFV	1	0	1	18
PCH	0.5	1	0.5	60
RSU	0	1	0	70
ACU	0	1	0	30
Diesel	1	0.5	0.5	80

4.1.1.5 Indicadores Políticos

Tabla 4-5. Indicadores Políticos

Alternativa	Participación Social	Formación Comunidad	Normas Nacionales	Riesgo Suministro
SFV	1	1	1	0
PCH	0.5	0.5	1	0
RSU	0	0	0.5	0
ACU	0	0	0.5	1
Diesel	0	0	1	1

En síntesis, la recopilación y sistematización de estos datos permitió consolidar un conjunto integral de indicadores ambientales, sociales, económicos, tecnológicos y políticos, cada uno sustentado en fuentes confiables y métodos de cálculo rigurosos. Los indicadores ambientales se construyeron a partir de factores de emisión, consumos de agua y áreas protegidas; los sociales y políticos se derivaron directamente de la percepción y participación de los actores locales; los económicos se fundamentaron en el cálculo del Costo Nivelado de Electricidad (LCOE) siguiendo estándares internacionales; y los tecnológicos reflejaron la adaptabilidad y desempeño operativo de cada alternativa. Este proceso asegura que la comparación entre tecnologías se realice con base en un panorama equilibrado y multidimensional, que integra tanto aspectos técnicos y económicos como consideraciones sociales e institucionales, sentando así las bases para la aplicación del método TOPSIS.

4.1.2 Matriz de decisión Inicial

Con base en las tablas 4-1 a 4-5, en la tabla 4-6 se consolida la matriz de todos los indicadores con sus respectivos valores por alternativa. Es decir, la tabla 4-6 muestra el valor de desempeño de cada tecnología para cada indicador, siendo esta la base para la aplicación de la herramienta TOPSIS.

Tabla 4-6. Valores de los indicadores

Indicador		Tecnología				
		Solar	Hidro	RSU	ACU	Diesel
Emisiones GEI Anual kg CO₂eq		888.003,95	433.172,66	15.341.531,6	15.341.531,6	15.341.531,6
Contaminantes kg/año	Nox	0	0	6.317,1	46.927,0	50.536,8
	Sox	0	0	2.256,1	27.073,3	2.707,3
	CO	0	0	1.804,9	2.707,3	11.731,8
	PM	0	0	541,5	1.804,9	2.346,4
	COV	0	0	1.082,9	722,0	1.082,9
Áreas protegidas %		0	0.0083	0	0	0
Consumo agua		1.353,67	902,44	36.097,72	13.536,64	9.024,43
% Renovables		100	100	0	0	0
Cobertura actual (%)		1	0	0	0	96.9
Potencial ampliación (%)		100	33	33	33	66
Aceptación social (%)		76	52	57	0	10
LCOE USD/kWh		0.035	0.019	0.505	28.076	0.265
O&M Costos		102.160,9	75.000	2.955.733,2	28.000	240.000
Precio final USD/kWh		0,06	0,03	0,71	39,31	0,37
Adaptabilidad		1	0.5	0	0	1
Logística		0	1	1	1	0.5
Mantenimiento						
Disponibilidad de combustibles		1	0.5	0	0	0.5
Factor capacidad (%)		18	60	70	30	80
Participación Social		1	0,5	0	0	0
Formación Comunidad		1	0,5	0	0	0
Normas Nacionales		1	1	0,5	0,5	1
Riesgo Suministro		0	0	0	1	1

4.2 Aplicación del Método TOPSIS

El método se aplicó en cuatro pasos secuenciales a la matriz de decisión:

4.2.1 Normalización de la Matriz

Para la construcción de la matriz de decisión, fue necesario realizar un proceso de normalización de los indicadores seleccionados con el fin de garantizar su comparabilidad y evitar que las diferencias de magnitudes o unidades influyeran en el resultado del análisis multicriterio. Dado que los indicadores presentan diversas unidades como kg CO₂eq, %, USD, kg/año, etc., y escalas, se empleó una técnica de normalización ampliamente utilizada y validada en la literatura académica sobre métodos multicriterio de decisión, especialmente en estudios relacionados con sostenibilidad energética: el método Min-Max.

El método Min-Max permite transformar los datos originales en un rango común de [0, 1], manteniendo las proporciones relativas entre ellos. Este enfoque es adecuado para su posterior uso en el método TOPSIS, que requieren la comparación de distancias euclidianas respecto a soluciones ideales positivas y negativas [69], [83], [84].

Según la naturaleza de cada indicador, se aplicaron dos variantes del método:

Normalización directa (beneficio, “más es mejor”): Se utilizó para aquellos indicadores cuyo valor deseable es máximo, tales como el porcentaje de energías renovables, cobertura del servicio, aceptación social, factor de capacidad, entre otros.

Normalización inversa (costo, “menos es mejor”): Se utilizó para aquellos indicadores cuyo valor deseable es mínimo, tales como emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), generación de contaminantes, consumo de agua, costos de inversión y operación, entre otros.

- Para indicadores de beneficio (directo)

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (Ec. 1)$$

- Para indicadores de costo (inversa)

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (Ec. 2)$$

Donde:

x_{ij} es el valor original del indicador para la alternativa i y el indicador j

x'_{ij} es el valor normalizado

$\max(x_j)$ y $\min(x_j)$ corresponden a los valores máximos y mínimos registrados en la columna del indicador j.

A partir del método Min-Max, las ecuaciones 1 y 2 se aplicaron columna a columna y se obtuvo la matriz normalizada como se muestra en la tabla 4-7.

Tabla 4-7. Matriz de decisión normalizada.

Indicador		Tecnología				
		Solar	Hidro	RSU	ACU	Diesel
Emisiones GEI Anual kg CO ₂ eq		0.97	1	0	0	0
Contaminantes kg/año	Nox	1	1	0.88	0.07	0
	Sox	1	1	0.92	0	0.9
	CO	1	1	0.85	0.77	0
	PM	1	1	0.77	0.23	0
	COV	1	1	0	0.33	0

Indicador	Tecnología				
	Solar	Hidro	RSU	ACU	Diesel
Áreas protegidas %	1	0	1	1	1
Consumo agua	0.99	1	0	0.64	0.77
% Renovables	1	1	0	0	0
Cobertura actual (%)	0.01	0	0	0	1
Potencial ampliación (%)	1	0	0	0	0.49
Aceptación social (%)	1	0.68	0.75	0	0.13
LCOE USD/kWh	1.00	1	0.98	0	0.99
O&M Costos	0.97	0.98	0	1	0.93
Precio final USD/kWh	1.00	1	0.98	0	0.99
Adaptabilidad	1	0.5	0	0	1
Logística Mantenimiento	0	1	1	1	0.5
Disponibilidad de combustibles	1	0.5	0	0	0.5
Factor capacidad (%)	0	0.68	0.84	0.19	1
Participación Social	1	0.5	0	0	0
Formación Comunidad	1	0.5	0	0	0
Normas Nacionales	1	1	0	0	1
Riesgo Suministro	1	1	1	0	0

4.2.2 Ponderación de la Matriz.

La asignación de pesos a las dimensiones e indicadores es un paso fundamental para reflejar de forma cuantitativa la importancia relativa que los actores locales asignan a cada aspecto de la sostenibilidad energética en el municipio de Leticia. Para este fin, se utilizó la información obtenida a través de las encuestas aplicadas.

Para este propósito, se emplearon los resultados obtenidos de las encuestas aplicadas a actores clave del territorio, las cuales permitieron identificar las dimensiones consideradas más relevantes por la comunidad y los expertos consultados. De acuerdo con los resultados, la dimensión ambiental fue percibida como la más importante (79%), seguida por la dimensión tecnológica (68%), política (60%), económica (52%) y social (49%). Estos pesos fueron normalizados para garantizar su coherencia metodológica, asegurando que la suma total de las ponderaciones fuera igual a uno. La tabla 3-12 presenta los pesos

finales asignados a cada dimensión tras su normalización y el valor de cada indicador por dimensión:

Tabla 4-8. Pesos finales de los indicadores.

Dimensión	Peso original (%)	Peso normalizado	Peso por indicador
Ambiental	79	0,26	0,051
Tecnológica	68	0,22	0,055
Económica	52	0,17	0,056
Política	60	0,19	0,049
Social	49	0,16	0,053
Total	308	1	

Dentro de cada dimensión, los indicadores fueron ponderados de forma equitativa al no haberse identificado diferencias significativas entre ellos en los resultados de las encuestas. Por lo tanto, el peso asignado a cada indicador corresponde al peso de su respectiva dimensión dividido entre el número de indicadores que la conforman.

4.2.3 Determinación de la Solución Ideal y coeficiente de cercanía

Una vez construida la matriz normalizada y ponderada, se procedió a identificar la solución ideal positiva (SIP) y la solución ideal negativa (SIN) para cada uno de los indicadores. Este paso es fundamental dentro del método TOPSIS, ya que permite establecer los puntos de referencia que servirán para calcular las distancias relativas de cada alternativa a la alternativa óptima y a la menos deseable.

La solución ideal positiva se define como el mejor valor alcanzado entre las alternativas para cada indicador, mientras que la solución ideal negativa corresponde al peor valor. En el contexto de la matriz normalizada, donde todos los indicadores ya se encuentran dentro

del rango [0, 1], estos valores extremos corresponden directamente al valor máximo y mínimo observado por cada indicador después de la ponderación.

La determinación de estas soluciones sigue las siguientes reglas:

- Para los criterios de beneficio (más es mejor):
 - La SIP es el valor máximo observado.
 - La SIN es el valor mínimo observado.
- Para los criterios de costo (menos es mejor) (ya normalizados inversamente):
 - La SIP es también el valor máximo (pues ya fue invertido en la normalización).
 - La SIN es el valor mínimo.

De este modo, la SIP y la SIN se determinan simplemente identificando los valores máximo y mínimo por columna en la matriz ponderada. La matriz resultante permite establecer las distancias euclidianas que se calcularán en la siguiente etapa para determinar qué alternativa se encuentra más cercana a la solución ideal y más alejada de la menos deseable

Las ecuaciones utilizadas para este cálculo son

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^+)^2} \quad (Ec. 3)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^-)^2} \quad (Ec. 4)$$

D_i^+ es la distancia de la alternativa i a la solución ideal positiva (SIP)

D_i^- es la distancia de la alternativa i a la solución ideal negativa (SIN)

x_{ij} es el valor ponderado del indicador j.

x_j^+ es el valor ideal positivo del indicador j

x_j^- es el valor ideal negativo del indicador j

n es el número total de indicadores.

Luego se calcula el coeficiente de cercanía de cercanía

El coeficiente de cercanía de cercanía permite expresar de forma cuantitativa que tan cerca se encuentra cada alternativa de la situación ideal. Se calcula mediante la fórmula

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (Ec. 5)$$

Donde:

CC_i es el coeficiente de cercanía de la alternativa i.

D_i^+ es la distancia a la solución ideal positiva.

D_i^- es la distancia a la solución ideal negativa

4.3 Resultados del Análisis

A partir del cálculo del coeficiente de cercanía relativo CC_i para cada alternativa energética, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 4-5. Dichos coeficientes reflejan el nivel de proximidad de cada alternativa respecto a la solución ideal positiva (mejor

desempeño) y su distancia de la solución ideal negativa (peor desempeño), de acuerdo con los criterios y pesos establecidos para Leticia.

Tabla 4-9. Ranking de Sostenibilidad para las Alternativas Energéticas en Leticia.

Tecnología	Soluciones Ideales		Coeficiente de cercanía
	Positivas	Negativas	
Solar	0.094	0.232	0.712
Hidro	0.108	0.209	0.660
RSU	0.182	0.16	0.468
ACU	0.214	0.11	0.339
Diesel	0.166	0.17	0.506

Este ranking constituye el resultado cuantitativo final del modelo de evaluación multicriterio

4.4 Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la herramienta TOPSIS ofrecen un panorama claro sobre la sostenibilidad de las alternativas energéticas para Leticia. El ranking final no es solo un listado de preferencias, sino el resultado de un análisis integral que equilibra el desempeño técnico, los costos económicos y, de manera crucial, las prioridades de la comunidad local. A continuación, se presenta una discusión detallada de estos hallazgos

La energía solar fotovoltaica presenta el mejor desempeño global en términos de sostenibilidad para el Municipio de Leticia ($CC_i^* = 0,712$), lo que indica que es la alternativa que presenta un desempeño global más próximo a la solución ideal según las dimensiones ambiental, social, económica, tecnológica y política consideradas en el modelo. Este resultado a primera vista, podría parecer contradictorio, dado que la energía hidroeléctrica presenta un LCOE menor. Sin embargo, el éxito de esta energía se explica al analizar su desempeño a la luz de las prioridades locales. La dimensión ambiental fue la más ponderada por los actores locales (peso de 0,26), y en esta, la solar muestra un desempeño

casi perfecto con cero emisiones de contaminantes locales y sin afectación a áreas protegidas. Aunque la hidroeléctrica también es renovable, su pequeño pero significativo impacto en el indicador de "Áreas protegidas" la penaliza fuertemente en la dimensión más importante para la comunidad. Adicionalmente, la solar destaca en indicadores sociales como la "Aceptación social" y la "Participación Social", superando a la hidroeléctrica y consolidando su ventaja. Esta posición refuerza la viabilidad de la energía solar como alternativa prioritaria para la diversificación y sostenibilidad del suministro energético en el municipio de Leticia.

La microhidroeléctrica se posiciona como la segunda alternativa más favorable ($CCi^* = 0,660$) mostrando un buen desempeño general, aunque inferior al de la solar. Si bien presenta ventajas importantes en eficiencia y costos, su implementación en Leticia se enfrenta a desafíos técnicos y mayores requerimientos logísticos y de infraestructura que limitan su competitividad frente a la energía solar.

Por el contrario, las alternativas relacionadas con residuos sólidos urbanos (RSU) y aceites usados (ACU) presentaron los coeficientes más bajos, lo que refleja sus limitaciones tanto en el aprovechamiento energético como en su alineación con los principios de sostenibilidad evaluados para un contexto de baja densidad poblacional y capacidad técnica limitada. Además, resulta en un bajo desempeño general a pesar de sus beneficios en la gestión de residuos.

Por su parte la tecnología diésel, aunque actualmente predominante en la cobertura energética de la región, se sitúa en una posición intermedia ($CCi^* = 0.506$). Esto evidencia que, aunque ha sido la opción históricamente adoptada, no se posiciona como la más sostenible a futuro debido a sus desventajas en aspectos ambientales, económicos y de dependencia de insumos externos. Su buen desempeño en indicadores técnicos como el factor de capacidad y la adaptabilidad es contrarrestado por un rendimiento adverso en la dimensión ambiental y un alto riesgo de suministro, lo que justifica su posición por debajo de las renovables principales, pero por encima de las alternativas basadas en residuos, que presentan serios desafíos económicos y de escala.

Estos resultados permiten establecer un orden de preferencia técnica y sostenibilidad entre las alternativas energéticas para el municipio de Leticia, siendo el modelo TOPSIS una herramienta efectiva para integrar múltiples criterios y apoyar la toma de decisiones en contextos complejos y con múltiples dimensiones de análisis.

Es fundamental reconocer que la robustez de estos resultados está sujeta a ciertas condiciones y limitaciones. El ranking obtenido es una consecuencia directa de la estructura del modelo y las ponderaciones asignadas por los actores clave consultados. Una muestra diferente o una jerarquización distinta de las prioridades podría alterar los resultados. Por ejemplo, si la dimensión económica hubiera recibido un peso mayor, la energía hidroeléctrica podría haber superado a la solar.

Asimismo, los resultados dependen de la calidad de los datos de entrada. Los cálculos de LCOE y potencial energético se basan en los mejores datos disponibles, pero están sujetos a incertidumbres que podrían ser refinadas con estudios de prefactibilidad más detallados.

Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones directas y significativas para la toma de decisiones. El ranking no debe interpretarse como una recomendación para implementar una única tecnología, sino como una guía para diseñar una estrategia de transición energética para Leticia.

- Estrategia a Corto y Medio Plazo: La clara ventaja de la energía solar sugiere que esta debería ser fundamental en cualquier plan de diversificación. Sin embargo, su principal debilidad es la intermitencia (bajo factor de capacidad). Esto implica la necesidad de considerar sistemas híbridos, donde la infraestructura diésel existente podría desempeñar un rol transicional como respaldo, reduciendo gradualmente su operación a medida que se incorporen soluciones de almacenamiento.
- Investigaciones Futuras Requeridas: El segundo lugar de la microhidroeléctrica indica que es una alternativa demasiado valiosa para ser descartada. La implicación es que se deben realizar estudios de impacto ambiental más detallados para

identificar posibles ubicaciones que minimicen o anulen la afectación a áreas protegidas, lo que podría mejorar significativamente su posición en el ranking.

- Barreras Políticas y de Gobernanza: Los resultados de la encuesta cualitativa, que señalan el modelo de concesión como una barrera, son validados por el ranking. Para que la energía solar o hidroeléctrica sea una realidad, es necesario que los marcos regulatorios se adapten para permitir nuevos actores y modelos de negocio, como la generación distribuida o las comunidades energéticas.

Por lo tanto, este estudio no debe ser visto como la respuesta definitiva, sino como un primer paso robusto y metodológicamente transparente en el proceso de toma de decisiones. Futuras líneas de investigación deberían incluir la realización de un análisis de sensibilidad cuantitativo para evaluar el impacto de las variaciones en los pesos y en los datos de entrada, así como la expansión del proceso de consulta para incluir.

5 Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo de investigación tuvo como propósito evaluar la sostenibilidad de las alternativas energéticas técnicamente viables para el municipio de Leticia. Para ello, se desarrolló un proceso metodológico robusto que inició con un análisis de viabilidad técnica de cinco fuentes (solar, hidroeléctrica, RSU, ACU y diésel), seguido de la construcción de un modelo de evaluación multicriterio de cinco dimensiones ambiental, social, económica, tecnológica y política cuyos principios y criterios fueron validados y ponderados a través de un panel de 21 actores clave locales.

La aplicación del método TOPSIS sobre este marco contextualizado permitió jerarquizar las alternativas, concluyendo que la energía solar fotovoltaica (con un coeficiente de sostenibilidad de 0.712) es la opción más equilibrada y sostenible para Leticia. Le siguen en orden de preferencia la microhidroeléctrica (0.660), el diésel como línea base (0.506), y finalmente, las alternativas basadas en residuos (RSU y ACU), cuyo potencial y desempeño global son más limitados para las necesidades del municipio.

La principal contribución de este estudio es doble. Por un lado, constituye un aporte pionero para la planificación energética de la Amazonía colombiana, ofreciendo una hoja de ruta clara para alinear el desarrollo de Leticia con los ODS. Por otro lado, la investigación aporta un modelo metodológico (D-P-C-I) validado y contextualizado, que demuestra la importancia de anclar las evaluaciones técnicas en principios de sostenibilidad definidos participativamente. Este marco no es solo una herramienta para Leticia, sino un enfoque replicable que puede guiar la toma de decisiones en otras Zonas No Interconectadas con desafíos similares.

El ranking resultante no es un fin en sí mismo, sino una herramienta de decisión estratégica. Permite a los planificadores y autoridades locales ir más allá de un simple análisis de costos y comparar las alternativas de forma integral. Se evidenció, por ejemplo, que si bien la hidroeléctrica destaca por su bajo costo (LCOE), la solar ofrece un mejor balance en las dimensiones ambiental y social, que fueron altamente valoradas por la comunidad. Estos hallazgos ofrecen una hoja de ruta clara para alinear el desarrollo energético de Leticia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7) y las metas nacionales de transición energética.

En consecuencia, la principal recomendación de este estudio es priorizar la inversión y el desarrollo de políticas que incentiven la implementación de la energía solar fotovoltaica como eje de la transición energética de Leticia. No obstante, es crucial reconocer las limitaciones de este análisis, las cuales definen las líneas de investigación futuras. Este estudio evalúa las fuentes de manera individual; sin embargo, la intermitencia de las renovables hace imperativo:

- Diseñar un mix energético óptimo que combine la alta generación solar con fuentes de base más estables, como la microhidroeléctrica, para garantizar la resiliencia y confiabilidad del sistema.
- Realizar un análisis técnico-económico detallado sobre sistemas de almacenamiento de energía (baterías), que son indispensables para una alta penetración de renovables en un sistema aislado.
- Profundizar en los modelos de negocio y marcos regulatorios que puedan viabilizar estos proyectos, aprendiendo de experiencias internacionales de electrificación rural indígena exitosas para empoderar a las comunidades locales.

En definitiva, esta investigación proporciona una evaluación fundamentada que orienta a Leticia hacia un futuro energético más autónomo, limpio y, fundamentalmente, alineado con los valores y prioridades de su territorio

ANEXO A: Listado de Dimensiones, Criterios e Indicadores tomados de la Literatura

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
Ambiental	Biodiversidad	Pérdida de biodiversidad	-	-	[5], [112]
		Deforestación	-	-	[5]
	Emisiones	Emisiones de CO2	Es la cantidad de CO2 liberado por sistemas energéticos; refleja el impacto ambiental y contribuye al cambio climático. Es una variable clave en la sostenibilidad energética.	Gco2/kwh	[1], [5], [23], [69], [83], [84], [112]
		Emisiones de GEI evitadas	-	-	[5], [31], [112], [113]
		Calidad del aire	-	-	[5], [29], [114]
		Emisiones de GEI	Emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida de la tecnología.	Gco2e/kwh	[2], [5], [6], [28], [31]
		Contaminación del aire	-	Mg/m3	[5], [112]
		Contaminación del aire y del agua	-	-	[5]
		Beneficios climáticos	-	-	[5]
		Emisiones de NOX	Son Óxidos de Nitrógeno emitidos por combustión; afectan la calidad del aire, la salud humana y la sostenibilidad ambiental de los sistemas energéticos	Kg/kwh (10^-6)	[5], [69], [84], [112], [115]
		Emisiones de SO2	Gas emitido por combustión fósil; causa lluvia ácida, enfermedades respiratorias y refleja el impacto ambiental del sistema energético evaluado.	Kg/kwh (10^-6)	[5], [69], [84], [115]
Residuos	Residuos	-	*MC	[5], [112]	

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
Impacto ambiental local		Uso del suelo	Cantidad de uso y degradación del suelo debido a la producción y consumo de energía durante su ciclo de vida	Km/twh - m2/kw	[5], [23], [28], [69], [83], [84], [112], [114], [115], [116]
		Inundaciones	Riesgo de acumulación excesiva de agua por alteración hidrológica; representa un riesgo ambiental derivado de modificaciones en el uso del suelo y la hidrología local causada en este caso por infraestructura energética. Este indicador permite evaluar la vulnerabilidad territorial y la necesidad de medidas de adaptación en el diseño y localización del sistema energético.	-	[5], [114], [116]
		Deslizamiento de tierras	-	-	[5]
		Fertilidad del suelo y salinidad	La resiliencia del ecosistema está indicada por las tendencias en las características del suelo para cada tipo de suelo.	**TA	[5], [117]
		Calidad del agua	-	-	[5]
		Sedimentación	-	-	[5], [116]
		Condiciones topográficas hidrológicas	-	-	[5]
		Ecosistemas	Impacto de la intervención sobre el medio ambiente local	-	[2], [5]
		Consumo de agua	-	Kg/kwh	[5], [31]
		Hábitat acuático	-	-	[5], [116]
		-	Indicadores biológicos	Ecotoxicidad del agua y ecotoxicidad terrestre	Kg 1,4-dcba e/kwh
-	Recursos subterráneos	-	-	[5]	

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
	-	Áreas protegidas	-	-	[5]
	-	Descarga de ríos	-	-	[5]
	-	Costos ambientales	-	-	[1], [5]
	-	Impacto en la red alimentaria	-	-	[5]
	-	Agotamiento evitado de recursos no renovables	-	-	[1]
	Uso y calidad de la tierra	Ocupación del territorio	Superficie ocupada a lo largo del tiempo	M2 año/ kwh	[6]
		Uso de terrenos verdes	Proporción de nuevos desarrollos en terrenos previamente no desarrollados en relación con el total de terrenos ocupados. Tasa de deforestación.	%	[6], [116]
	Impacto local	Impacto Ambiental Adverso	No se han producido impactos ambientales locales adversos	-	[9]
		Conciencia Ambiental	La conciencia de la comunidad sobre los problemas y el entorno ambiental han mejorado.	-	[9]
	Ley	Cumplimiento de la legislación	-	-	[116]
	Recreación	Paisaje			[116]
	Emisiones de ruido	Ruido	Contaminación acústica generada por sistemas energéticos; afecta la salud humana, el bienestar de la biodiversidad y constituye un impacto ambiental y social relevante. Se mide de la siguiente manera "Construcción + Operación + Tráfico".	*MC	[5], [116], [118]
	Fuentes energéticas	Porcentaje de incremento en	-	%	[42]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
		participación hidroeléctrica			
		Participación de fuentes renovables	Los recursos naturales deben estar disponibles para la conversión y el exceso debe reflejar la eficiencia y la necesidad de un suministro estable. Producción local de energía	% de necesidad	[9], [42], [114], [116], [117], [119]
		Participación de generación térmica	-	%	[9], [42]
		Porcentaje de producción de energía renovable	-	%	[84]
	Costos Ambientales	Costos externos	Costos generados durante todo el ciclo de vida de una unidad de generación de electricidad que son soportados por entidades distintas a las partes directamente involucradas con la unidad; este componente se refiere a costos ambientales (mantenimiento de suelos, limpieza de polvo, etc.)	-	[120]
	-	Generación de contaminantes	Tipos	-	[112]
	-	Olor	-	*MC	[112]
-	Diversidad de la comunidad biológica	La resiliencia del ecosistema está indicada por las tendencias en las poblaciones indicadoras para el tipo de ecosistema.	**TC	[117]	
Económica	Costos de operación y mantenimiento	Costos de operación y mantenimiento	Son los gastos fijos y variables destinados a operar y preservar sistemas energéticos; afectan viabilidad económica, confiabilidad y vida útil.	\$/kwh	[1], [5], [6], [28], [69], [118]
		Costos de capital y mantenimiento	-	\$/kwh	[1], [5], [83], [116], [118], [121]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
		Costos de operación e Inversión	Costo total de la instalación y funcionamiento de sistemas energéticos; clave para evaluar su viabilidad económica y retorno de inversión.	-	[5], [69]
	Costo de capital /inversión	Costos de capital e instalación	-	\$/kwh	[5]
		Reinversión	-	-	[5], [75]
		Alta inversión inicial	Inversión inicial necesaria para implementar el sistema técnico (compra e instalación).	\$/kw	[5], [28], [115]
		Retorno de la inversión (ROI)	-	-	[113], [117]
		Coste del proyecto	Costo de construcción, costo de materiales, mano de obra, equipos, permisos, inspecciones y otros gastos indirectos	-	[5]
	Otros	Coste de electricidad-coste de la energía	Precio por unidad de energía suministrada; refleja eficiencia económica del sistema y accesibilidad para consumidores, gobierno e inversionistas.	-	[5], [69], [113]
		Costos de combustibles	Gasto en adquisición, transporte y procesamiento de combustible; varía según contexto y afecta la competitividad económica del sistema energético.	\$/kwh	[28], [69], [84], [121]
		Costos fijos	-	-	[1], [77], [116]
	Costo Nivelado de electricidad	Costo unitario de electricidad	-	\$/kwh	[5], [23], [31], [115]
		Costo nivelado de la electricidad (LCOE)	El coste medio de producir electricidad durante toda la vida útil de la unidad; tiene en cuenta todos los costes de inversión, operación y mantenimiento, combustible, desmantelamiento e incluso emisiones de CO2. Coste neto actual medio de la energía para cada opción tecnológica	-	[5], [26], [120]
		Costo total nivelado	-	\$/kwh	[121]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
		Precio de la generación de electricidad	-	USD/kwh	[31], [84]
	Bienestar y calidad de vida relacionadas con el uso de energía	Costo de salud	Modelo del Banco Mundial sobre salud de los adultos para la productividad: 0,4% de productividad por cada 10 años de esperanza de vida.	-	[5], [117]
		Costos del ciclo de vida	-	-	[116]
		No. De nuevas actividades generadoras de ingresos	-	-	[116]
		Actividades comerciales	-	-	[29]
	Indicadores Financieros (rentabilidad, retorno)	TIR	Tasa Interna de retorno	-	[5]
		VPN	El VPN, también llamado valor actual neto (VAN), es la diferencia entre los ingresos y los costos futuros descontados a valor presente; refleja viabilidad económica de proyectos energéticos a largo plazo.	-	[5]
		Coste actual neto (NPC)	-	-	[113]
		Coste Anual equivalente (CAE)	El costo anual equivalente de un proyecto de energía es el costo por año de poseer y operar un activo durante toda su vida útil. Útil para comparar alternativas con duraciones distintas.	-	[69]
	Seguridad energética	Menor dependencia de la energía importada	-	-	[5]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
	Demanda Consumo energético	Consumo de electricidad per cápita	-	-	[42]
		Consumo eléctrico del sector industrial y comercial	-	-	[42]
	Tarifas y mecanismos	Tarifas de compensación	-	-	[5], [42], [121]
		Patrón de recaudación de tarifas	-	-	[116]
		Cobro tarifario mensual	-	-	[116]
	Flexibilidad Operativa y técnica	Despachabilidad económica	Relación entre el costo de capital y el costo total de generación nivelado	-	[121]
Social	Mejora de la disponibilidad de servicios sociales de electricidad	Proporción de centros de salud y escuelas	Proporción de centros de salud y escuelas con electricidad	-	[1], [77]
		Número de farolas en la zona	-	-	[1], [77]
	Estabilidad social	Reasentamiento	Colonización, migración, pérdidas de medio de vida y de identidad cultural. Conflicto social. Reasentamiento/Reubicación/perturbación del espacio vital	-	[5], [116], [118]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
	Provisión de empleo	Creación de empleo	# de empleos directos generados localmente por el sistema energético; refleja impacto social y contribución al desarrollo económico regional. Empleos por MW de capacidad instalada.	# empleos / mwh	[5], [9], [28], [69], [83], [84], [114], [115], [117], [118], [121]
	-	Inmigración	-	-	[5]
	-	Capital producido	Ingresos. Cantidad (%) y capacidad (nivel TIER) de sistemas instalados para fines productivos y comparación de la capacidad instalada y los estándares nacionales mínimos para respaldar las necesidades energéticas productivas	-	[5], [26]
	-	Diversidad y vitalidad	-	-	[5]
	-	Recreación	-	-	
	-	Turismo	-	-	[5]
	-	Sitios patrimoniales	-	-	[5]
	Salud	Salud humana	-	C/kwh	[5], [8], [9], [29], [115], [116], [117], [118]
	Impacto Social/Alivio de la pobreza	Nivel de vida	Mejora de la calidad de vida-Desigualdad y alivio de la pobreza. Impacto del sistema energético en el bienestar, pobreza energética e ingresos; refleja mejorar percibidas en calidad de vida local.	-	[2], [5], [8]
	-	Aceptación pública	Percepción y apoyo social hacia el sistema energético; influye en su viabilidad, implementación y tiempo de ejecución del proyecto. La aceptabilidad social se empleó para analizar sus viabilidades de cogeneración, plantas de energía renovable, etc.	*MC	[2], [5], [25], [114]
	Seguridad energética	No. De proveedores locales	Cantidad de actores locales activos; refleja competitividad, autonomía comunitaria e inversión directa en economías locales relacionadas con la electricidad.	%	[1], [77], [84], [116], [121]
		Capacidad innovadora	-	-	[5]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
	Usos del agua	Abastecimiento de agua	Protección contra sequías e inundaciones	*MC	[5], [112]
	-	Acceso servicios básicos	Se requieren servicios básicos para la productividad.	-	[117]
	Impactos en la comunidad local	Impacto en la población local	Potencial de conflicto y catástrofe. Proporción de personal contratado de la comunidad local en relación con el empleo directo total. Impacto negativo en la salud.	%	[2], [5], [121]
		Tasas de compensación	Se ofrecen subsidios para servicios eléctricos	-	[1], [5], [77]
		Pérdida de productividad agrícola	-	-	[5]
		Desarrollo de infraestructura	-	-	[5]
	Equidad intergeneracional	Utilización de recursos abióticos	Elementos	Kg*Sb eq/kwh	[121]
	Distribución equitativa	Proporción de población con educación primaria (H/M)	-	-	[1], [77]
	-	Proporción de población con acceso a electricidad (H/M)	-	-	[1], [77]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
-	-	Evaluación de necesidades	Evaluación de la necesidad de la intervención mediante la interacción con la comunidad o los miembros.	-	[2]
-	-	Independencia financiera	Independencia financiera en la gestión de los ingresos de los miembros	-	[2]
Educación	Mejora en el servicio educativo		El mejor indicador general de la capacidad de los humanos para mejorar la productividad. Modelo del Banco Mundial de educación de adultos para la productividad: 0,5% de productividad anual en la escuela, debido a la electricidad	%	[9], [26], [116], [117], [122]
Disponibilidad del servicio mejorada	Se utiliza electricidad en el centro comunitario	-		-	[9]
	Existencia de alumbrado público	-		-	[9]
	Las cargas de las mujeres se han reducido.		Las cargas se han reducido gracias a la electricidad	-	[9]
Participación de la comunidad	Capacitación comunitaria		Capacitación de miembros de la comunidad y operadores locales.	-	[116]
	Sentido de pertenencia	-		-	[116]
	Auto gobernabilidad	-		-	[116]
	Autosuficiencia	-		-	[116]
	Igualdad	-		-	[116]
-	-	Seguridad del uso de la electricidad.	-	-	[116], [119]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias	
	Servicio eléctrico	Confiabilidad del servicio	Impacto en el barrio. Impacto negativo de la intervención en el barrio	-	[2], [116]	
		Calidad del servicio	-	-	[116]	
	Satisfacción del usuario	Satisfacción con los costos	-	-	[116]	
		Cambio percibido en la calidad de vida.	Percepción comunitaria sobre mejoras sociales derivadas del proyecto energético; refleja progreso en empleo, ingresos y bienestar y regiones locales. Se mide como horas de trabajo de producción vendible	Horas de trabajo	[25], [116]	
	Usos Finales	Compatibilidad de la tecnología	Capacidad técnica para usar la electricidad para diversas actividades generadoras de ingresos o aplicaciones.	-	[28], [116]	
	-	Tiempo adicional para mujeres	-	-	[29], [119]	
		Independencia de las mujeres	-	-	[29], [119]	
	Conectividad comunitaria	Conexión interna y externa	-	-	[29], [119]	
		Actividades comunitarias	Actividades relacionadas con la electricidad	-	[29], [116], [119]	
		Costo social	-	-	[84]	
	-	Impacto en el valor de la tierra	-	-	*MC	[112]
	-	Desarrollo de la economía local	-	-	*MC	[112]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
	-	Esperanza de vida	La mejor medida general de la resiliencia de los sistemas sociales es la esperanza de vida promedio. Prueba de alfabetización estándar.	-	[5], [117]
Político	-	Mecanismo de Implementación	Presencia de protocolos de instalación y puesta en marcha y mecanismo de evaluación (transparencia del proceso)	-	[8], [26]
	-	Modelo de Operación y Mantenimiento (O&M)	Estructura de ejecución y supervisión de O&M (principales entidades responsables y procedimientos)	-	[8], [26]
		Capacitación y participación comunitaria	Estrategia de formación local y participación comunitaria	-	[8], [26]
	Salud humana	Costos externos	Costos que se generan a lo largo de todo el ciclo de vida de una unidad de generación de electricidad y que son soportados por entidades distintas a las partes directamente involucradas con la unidad; este componente se refiere a los costos de salud humana (hospital y medicamentos, pérdida de productividad, etc.)	-	[120]
	-	Aceptabilidad social	Preferencia pública por el despliegue o utilización de una determinada tecnología de generación de electricidad	-	[120]
	-	Riesgo de suministro externo	El riesgo de que se produzca un shock de oferta debido a las importaciones de combustible	-	[120]
	Desarrollo Regional y comunitario	Desarrollo regional	-	-	[5]
	-	Obstáculo legal	-	-	[5]
	-	Conformidad con las normas nacionales	-	-	[1], [77]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
-		Estrategia de electrificación tecnológica	Porcentaje de la configuración de la RED (microrred o sistemas individuales) y la fuente renovable utilizada (solar, eólica)	-	[26]
-		Variación del indicador de electrificación rural	Meta de electrificación rural, incremento porcentual de habitantes rurales con acceso a energía en sus hogares durante el horizonte del programa, contribución neta del programa al IRE para completar la universalización	-	[26]
-		Perfil de los beneficiarios	Comparación de las prioridades iniciales del programa y el perfil de los beneficiarios finales (características geográficas, socioeconómicas y culturales)	-	[26]
-		Proceso de selección de beneficiarios	Tomadores de decisiones, principales criterios aplicados y condiciones de aceptación local en la selección de beneficiarios	-	[26]
-		Instrumentos de política	Principales instrumentos legales/regulatorios y económico-financieros aplicados durante el programa	-	[26]
-		Estructura de financiación	Origen porcentual de los recursos económicos del programa y sostenibilidad de las fuentes	-	[26]
-		Nivel de satisfacción	Nivel de satisfacción con los servicios energéticos.	-	[1], [77]
-		Capacidad de utilizar la capacidad total	Capacidad de los miembros para operar la fuente de energía a su máxima capacidad	-	[2]
-		Mantenimiento	Acuerdo de mantenimiento con agencia externa	-	[2]
-		Satisfacción con la fuente de energía	Satisfacción de los miembros con la unidad eléctrica	-	[2]
-		Procedimientos operativos estándar (SOP)	Procedimientos operativos estándar para el funcionamiento de la unidad eléctrica	-	[2]
-		Documentación	Mantenimiento de documentos y registros para la operación de la unidad eléctrica	-	[2]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
	Participación de las partes interesadas	Participación de los interesados en el sistema	-	-	[9]
	-	Capacidad operativa y de gestión requerida	Habilidades/capacidades necesarias a nivel local para operar y gestionar las tecnologías.	-	[28]
	-	Dependencia energética	-	-	[114]
	-	Asignación y control de recursos	Asignación y control de recursos. Se trata del sistema de subsidios para indigentes que está controlado por la autoridad responsable.	# Contratos	[117]
	-	Protección jurídica	Protección jurídica de los controles sobre los recursos, mediante contratos entre proveedores y usuarios.	# contrat /serv de trabajo	[117]
	-	Acceso al crédito	Esto se realiza a través de instituciones financieras que pueden utilizar los activos como garantía para préstamos.	% de activos	[117]
	-	Acceso a recursos básicos	El acceso a los recursos básicos está garantizado por la Constitución: agua y energía, incluidos la energía, el agua potable y el saneamiento.	-	[117]
Tecnológico	Respuesta a la demanda	Capacidad de respuesta a la demanda	La capacidad de responder a la demanda máxima y garantizar la estabilidad general de la red a largo plazo en el contexto de una proporción creciente de generación intermitente a partir de algunas fuentes de energía renovables		[120]
	-	Aumento de la productividad	Capacidad del sistema energético para ayudar a la producción, p. Ej. Energía eléctrica para medios de producción. Porcentaje de aumento en la producción.	%	[117]
	-	Eficiencia	La eficiencia con la que la energía de entrada (por ejemplo, la energía química extraída de los combustibles) se transforma en energía de salida útil (es decir, electricidad y calor útil).	-	[120]

Dim	Criterios o Variables clave	Indicador	Definición	Unidad	Referencias
	-	Factor de capacidad	Una medida de la electricidad real producida durante un período de tiempo dividida por la electricidad teórica máxima que podría haberse producido si la planta hubiera estado funcionando a su capacidad nominal.	-	[120]
	-	Funcionalidad del sistema	-	-	[119]
	Operabilidad	Factor de capacidad	Potencia de salida como porcentaje de la potencia máxima. Se define como la cantidad de electricidad que produce durante un período, dividida por la cantidad de electricidad que podría haber producido si hubiera funcionado a plena potencia durante ese período	%	[5], [69], [116], [119], [121]
	-	Factor disponibilidad	Porcentaje de tiempo que una planta está disponible para producir electricidad	%	[121]
	-	Eficiencia y limitaciones tecnológicas	-	-	[1], [5]

ANEXO B: Lista de principios

Autor	#	Principio	Descripción
Química verde - Paul Anastas y John Warner	1	Prevención de residuos	Es mejor prevenir los residuos que tratarlos o limpiarlos una vez creados.
	2	Economía Atómica	Los métodos sintéticos deben diseñarse para maximizar la incorporación de todos los materiales utilizados en el proceso en el producto final.
	3	Síntesis química menos peligrosa	Siempre que sea posible, los métodos sintéticos deberían diseñarse para utilizar y generar sustancias que tengan poca o ninguna toxicidad para la salud humana y el medio ambiente.
	4	Diseño de productos químicos mas seguros	Los productos químicos deben diseñarse para preservar la eficacia de su función y reducir la toxicidad.
	5	Disolventes y auxiliares más seguros	Siempre que sea posible, se debe evitar el uso de sustancias auxiliares (por ejemplo, disolventes, agentes de separación, etc.) y deben ser inocuas cuando se utilicen.
	6	Diseño para la eficiencia energética	Se deben reconocer los impactos ambientales y económicos de los requerimientos energéticos y minimizarlos. Los métodos de síntesis deben realizarse a temperatura y presión ambiente.
	7	Uso de materias primas renovables	Una materia prima o materia prima debe ser renovable en lugar de agotarse siempre que sea técnica y económicamente factible.
	8	Reducir derivadas	Se debe minimizar o evitar, si es posible, la derivatización innecesaria (uso de grupos bloqueantes, protección/desprotección, modificación temporal de procesos físicos/químicos), porque dichos pasos requieren reactivos adicionales y pueden generar desechos.
	9	Catálisis	Los reactivos catalíticos (lo más selectivos posible) son superiores a los reactivos estequiométricos.
	10	Diseño para la degradación	Los productos químicos deben diseñarse de forma que al final de su función se descompongan en productos de degradación inocuos y no persistan en el medio ambiente.
	11	Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación	Es necesario desarrollar más metodologías analíticas para permitir el seguimiento y control del proceso en tiempo real antes de la formación de sustancias peligrosas.
	12	Química inherentemente más segura para la prevención de accidentes	Las sustancias y la forma de las sustancias utilizadas en un proceso químico deben elegirse para minimizar la posibilidad de accidentes químicos, incluidos liberaciones, explosiones e incendios.
Economía circular -	1	Eliminar los residuos y la contaminación.	circular, reutilizar, reparar, reacondicionar, remanufacturar y, como último recurso, reciclar. Desarrollar productos y procesos que minimicen residuos y maximicen su reutilización.

Autor	#	Principio	Descripción
Fundación Hellen MacArthur	2	Hacer circular productos y materiales	Reparar, reutilizar y reacondicionar productos para prolongar su vida útil.
	3	Regenerar la naturaleza.	Apoyar los procesos naturales y dejar más espacio para que la naturaleza prospere.
	4	Preservar y mejorar el capital natural	Utilizar los recursos naturales de manera sostenible, promoviendo su regeneración.
Observatorio de desarrollo económico	5	Optimizar el uso de los recursos	Maximizar la reutilización, el reciclaje y la eficiencia en el uso de materiales y energía.
	6	Promover la eficacia de los sistemas	Maximizar la reutilización, el reciclaje y la eficiencia en el uso de materiales y energía.
Principios de la Ingeniería verde- Declaración de Sandestin 2004	1	Diseñar procesos y productos	Utilizar análisis de sistemas que integre herramientas de evaluación del impacto ambiental de manera integral.
	2	Conservar y mejorar los ecosistemas naturales	Protegiendo la salud y el bienestar humanos.
	3	Ciclo de vida de productos	Utilice el pensamiento del ciclo de vida en todas las actividades de ingeniería.
	4	Diseñar para la eficiencia energética	Asegúrese de que todas las entradas y salidas de materiales y energía sean tan seguras y benignas como sea posible.
	5	Minimizar el agotamiento de los recursos naturales.	Reducir la cantidad de materiales y energía utilizados en la fabricación y operación de productos.
	6	Esforzarse por evitar el desperdicio.	Optimizar el uso de materiales, agua y energía en todos los procesos.
	7	Desarrollar y aplicar soluciones de ingeniería	Tener en cuenta la geografía, las aspiraciones y las culturas locales.
	8	Crear soluciones de ingeniería	Más allá de las tecnologías actuales o dominantes; mejorar, innovar e inventar (tecnologías) para lograr la sostenibilidad.
	9	Involucrar a las comunidades y partes interesadas	Involucrar activamente en el desarrollo de soluciones de ingeniería.
Principios del desarrollo sostenible-	1	Derecho humano fundamental	Todos los seres humanos tienen el derecho fundamental a un medio ambiente adecuado para su salud y bienestar.
	2	Igualdad entre las generaciones	Los Estados deberán conservar y utilizar el medio ambiente y los recursos naturales para beneficio de la presente y de las futuras generaciones.

Autor	#	Principio	Descripción
informe Brundtland.	3	Conservación y utilización sostenible	Los Estados mantendrán los ecosistemas y los procesos ecológicos indispensables para el funcionamiento de la biosfera, conservarán la diversidad biológica y observarán el principio del óptimo rendimiento sostenible en la utilización de los recursos naturales vivos y de los ecosistemas.
	4	Normas para el medio ambiente y vigilancia	Los Estados establecerán normas adecuadas de protección del medioambiente, vigilarán los cambios en la calidad del medio ambiente y la utilización de los recursos, además, publicarán los datos pertinentes.
	5	Evaluaciones previas del medio ambiente	Los Estados realizarán o requerirán evaluaciones previas de las actividades que se propongan y que puedan afectar considerablemente al medio ambiente o a la utilización de los recursos naturales.
	6	Notificación previa, igualdad de acceso y proceso imparcial	Los Estados informarán oportunamente a todas las personas que probablemente vengán a resultar afectadas por una actividad proyectada y les otorgará igualdad de acceso y un proceso imparcial en los procedimientos administrativos y judiciales.
	7	Desarrollo sostenible y asistencia	Los Estados asegurarán que se trate la conservación como parte integrante de la planificación y ejecución de las actividades de desarrollo y proporcionarán asistencia a otros Estados, en especial a países en desarrollo, en apoyo de la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible.
	8	Obligación general de cooperar	Los Estados cooperarán de buena fe con los otros Estados en la aplicación de los derechos y deberes precedentes.
	9	Utilización equitativa y razonable	Los Estados utilizarán los recursos naturales transfronterizados de manera razonable y equitativa.
	10	Prevención y supresión	Los Estados prevendrán o suprimirán toda interferencia ambiental transfronteriza que pudiera causar o causare daño considerable (pero con sujeción a ciertas excepciones previstas en los puntos 11 y 12).
	11	Responsabilidad estricta	Los Estados adoptarán todas las medidas de precaución razonables para limitar el riesgo cuando realicen o permitan ciertas actividades peligrosas, aunque beneficiosas; y asegurarán que se otorgue indemnización en caso de que ocurran importantes daños transfronterizos, aun cuando en el momento en que las actividades se iniciaron no se supiera que serían dañosas.
	12	Acuerdos previos cuando los costos de prevención sean notablemente superiores a los daños	Los Estados concretarán negociaciones en el Estado afectado, acerca de las condiciones equitativas en las que se podría llevar a cabo la actividad cuando proyecten realizar o permitir actividades que causen daños transfronterizos que sean importantes; pero mucho menores que los costos de prevención.

Autor	#	Principio	Descripción
	13	No discriminación	Los Estados aplicarán, como mínimo, las mismas normas que aplican a nivel nacional, respecto del medio ambiente y las repercusiones sobre los recursos naturales y las interferencias ambientales que traspasan las fronteras (es decir, no hacer a otros lo que no se haría a los propios ciudadanos).
	14	Obligación general de cooperar en problemas ambientales transfronterizos	Los Estados cooperarán de buena fe con los otros Estados para lograr la óptima utilización de los recursos naturales transfronterizos y la prevención o suspensión efectivas de las interferencias ambientales transfronterizas.
	15	Intercambio de informaciones	Los Estados de origen proporcionarán información oportuna y pertinente a los otros Estados interesados, en lo que respecta a los recursos naturales o interferencias ambientales que traspasen las fronteras.
	16	Evaluación y notificación previas	Los Estados proporcionarán notificación previa y oportuna e información pertinente a los demás Estados interesados y realizarán o requerirán una evaluación ambiental de las actividades proyectadas que pudieren tener importantes efectos fronterizos.
	17	Consultas previas	Los Estados de origen consultarán con tiempo y de buena fe con los otros Estados interesados, respecto de interferencias existentes o posibles en la utilización de un recurso natural o del medio ambiente.
	18	Acuerdos de cooperación para la evaluación y protección del medio ambiente	Los Estados cooperarán con los demás Estados interesados en la vigilancia, la investigación científica y el establecimiento de normas relativas a los recursos naturales transfronterizos y a las interferencias ambientales.
	19	Situaciones de emergencia	Los Estados deberán elaborar planes de urgencia para las situaciones de emergencia que pudieren causar interferencias ambientales transfronterizas; además proporcionarán información pertinente y cooperarán inmediatamente con los Estados interesados cuando ocurran emergencias.
	20	Igualdad de acceso y trato	Los Estados otorgarán igualdad de acceso, un proceso imparcial e igualdad de trato en los procedimientos administrativos y judiciales a todas las personas que sean o puedan ser afectadas por interferencias transfronterizas cuando se haga uso de un recurso natural o del medio ambiente.
	21	Responsabilidades de los Estados	Los Estados cesarán en las actividades que quebranten una obligación internacional relativa al medio ambiente y otorgarán indemnización por el daño causado.
	22	Arreglo pacífico de las controversias	Los Estados solucionarán por medios pacíficos las controversias relativas al medio ambiente. Si en 18 meses no se llega a un acuerdo mutuo sobre una solución u otro arreglo de la controversia, éste se someterá a procedimiento de conciliación y, si no se resuelve, a arbitraje o a procedimiento judicial, a petición de cualquiera de los Estados interesados.

Autor	#	Principio	Descripción
Afgan 2004	1	Uso de índice de sostenibilidad como función de aglomeración de indicadores	-
	2	Minimización de impacto ambiental	-
	3	equidad y bienestar social	-
	4	innovación y viabilidad tecnológica	-
Wang 2009	1	Principio sistémico	El sistema de indicadores debe reflejar de forma clara las características esenciales y el desempeño global de los sistemas energéticos. La función de evaluación integral de indicadores múltiples puede obtener mejores resultados que la suma de evaluaciones de criterios individuales.
	2	Principio de coherencia	El sistema de indicadores debe ser coherente con el objetivo del DM.
	3	Principio de independencia	Los indicadores no deben tener una relación de inclusión en el mismo nivel de indicadores. Los indicadores deben reflejar el desempeño de las alternativas desde diferentes aspectos.
	4	Principio de mensurabilidad	Los indicadores deben ser mensurables en valor cuantitativo, en la medida de lo posible, o expresados cualitativamente.
		Principio de comparabilidad	El resultado de la DM es más racional cuando la comparabilidad de los criterios es más evidente. Además, los indicadores deben normalizarse para poder comparar u operar directamente cuando existen tanto indicadores de beneficio como indicadores de costo.
Leclerc, 2024	1	La producción de energía debería ser económicamente asequible a la población	-
	2	La producción de energía debería generar modelos económicos sostenibles	-
	3	La producción de energía debería minimizar las emisiones atmosféricas contaminantes	-
	4	La producción de energía debería minimizar su impacto negativo sobre los recursos y la biodiversidad	-

Autor	#	Principio	Descripción
	5	La producción de energía debería impactar positivamente a la población	-
	6	La producción de energía debe ser técnicamente viable	-
	7	La producción de energía debería estar alineada con las políticas internacionales y nacionales	-
López, Luis. 2022	1	Garantizar una infraestructura que satisfaga la demanda con un suministro continuo de energía.	-
	2	Disponibilidad suficiente de recursos para ser utilizados en la producción de energía	-
	3	Obtener los recursos financieros para llevar a cabo el proyecto	-
	4	Participación e inclusión de entidades con diferentes intereses para llegar a un acuerdo común.	-
	5	Apoyo de las partes interesadas al proyecto	-
	6	Fomentar la generación y el intercambio de conocimientos	-
	7	Definir un precio acorde al contexto del proyecto.	-
	8	Aumentar recursos de entidades públicas para proyectos de suministro de energía	-
	9	Hacer un uso eficiente del espacio	-

Autor	#	Principio	Descripción
	10	Cambiar la percepción de la distribución de riesgos y beneficios en las comunidades vecinas	-
	11	Garantizar el uso de materiales de alta calidad y buenas prácticas de fabricación con alta productividad	-
	12	Reducción de polución causada por combustibles fósiles	-
	13	Identificar problemas potenciales lo más rápido posible	-
	14	Gestión del tiempo del proyecto	-
	15	Alta accesibilidad a materiales, herramientas y personal de trabajo.	-
	16	Participación de personal especializado para la solución de problemas durante la ejecución del proyecto	-
	17	Seleccione tecnologías fáciles de usar y de adquirir	-
	18	Garantizar un desarrollo del proyecto según los tiempos estimados	-
	19	Producir energía a un precio competitivo en el mercado local	-
	20	Generación de energía para satisfacer la demanda	-
	21	Realizar controles para asegurar procesos de acuerdo a la normativa	-

Autor	#	Principio	Descripción
	22	Seguir la normativa existente relacionada con el desarrollo del proyecto.	-
	23	Integración de la energía generada a la red de distribución existente	-
	24	Garantizar un tratamiento adecuado de residuos y emisiones	-
	25	Minimización del impacto ambiental	-
	26	Obtener la información necesaria para encontrar el mejor camino para la producción de energía	-
	27	Respetar el territorio destinado a una posible construcción de un sistema de producción de energía	-
	28	Prevención de riesgos	-
	29	Apoyar la integridad del proyecto ante un evento adverso inesperado	-
Gómez Juan, 2023	1	Principio de prevención	Es preferible prevenir la degradación ambiental, que intentar remediarla más tarde. este principio es fundamental en la actuación ambiental, debido al alto potencial de irreparabilidad de los daños ambientales, es de atención a riesgos de forma previa y en el funcionamiento del mismo. Destaca la importancia de tomar medidas proactivas para evitar daños ambientales. Esto implica la adopción de políticas y prácticas, que promuevan la conservación y la sostenibilidad, por ejemplo: la implementación de tecnologías limpias, la gestión adecuada de residuos y la protección de los ecosistemas frágiles.
	2	Principio de precaución	Es un enfoque utilizado en la toma de decisiones sobre el medio ambiente, cuando existe la posibilidad de daño grave o irreversible, este se aplica en circunstancias en las que la evidencia científica es insuficiente, contradictoria o incierta, pero hay indicios de posibles riesgos para el medio ambiente o la salud humana. búsqueda de herramientas analíticas que puedan ser transformadas en instrumentos políticos, legales y de planificación más efectivos. Ante la falta de certeza científica absoluta, es mejor prevenir o tomar medidas

Autor	#	Principio	Descripción
			protectoras antes que, esperar a tener pruebas concluyentes de los efectos perjudiciales. Sugiere que se deben tomar medidas preventivas cuando haya indicios razonables de peligro.
	3	Principio de equidad intergeneracional	Supone que el ser humano forma parte del medioambiente y que, en tanto que ser pensante, tiene el deber de cuidar de él para las generaciones futuras
	4	Principio de progresividad	Los objetivos ambientales deberán ser logrados en forma gradual, a través de metas transitorias y finales, proyectadas en un cronograma temporal, que facilite la adecuación correspondiente a las actividades relacionadas con esos objetivos
	5	Principio de responsabilidad ambiental	Todos somos corresponsables de mantener un medio ambiente sano, y debemos adoptar conductas responsables en nuestras acciones cotidianas
	6	Principio de sustentabilidad	Debemos satisfacer las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades, se trata de un Estado de equilibrio en constante cambio, en la interacción entre una población y sus actividades y la capacidad de su entorno para mantenerlas. Se trata de utilizar los recursos naturales de manera responsable y garantizar la conservación del medio ambiente a largo plazo, a partir de tareas específicas: a) Conservación de los recursos naturales, el agua, el aire, los suelos, los bosques y la biodiversidad. b) Mitigación del cambio climático, mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. c) Uso eficiente de los recursos, implica utilizar los recursos de manera eficiente y minimizar el desperdicio.
	7	Principio de congruencia ambiental	Se refiere a la necesidad de que las acciones humanas estén en armonía con los procesos y ciclos naturales del medio ambiente; es decir, las actividades humanas deben ser compatibles con la capacidad de carga de los ecosistemas y respetar sus límites, por ejemplo: a) equilibrio ecológico, b) ciclos naturales y c) adaptación a las limitaciones del entorno

ANEXO C: Filtro de los indicadores

De la tabla presentada en el anexo anterior se constituye una nueva lista a partir de los principios elegidos por la población de Leticia, que puede ser analizada a partir de una metodología de juicio experto contextualizado y un análisis multicriterio básico y obtener los 20 indicadores a medir en este estudio.

tabla a la cual se le realiza una evaluación de análisis multicriterio básico basado en tres criterios clave de evaluación presentados en la tabla 11.

Tabla 11: Descripción de los criterios

Criterio	Descripción
Disponibilidad de datos	Existencia o estimabilidad de información en contextos rurales antes de la implementación del proyecto
Facilidad de medición	Simplicidad técnica o existencia de metodologías estandarizadas para obtener el valor del indicador
Relevancia para la toma de decisiones	Capacidad del indicador para diferenciar entre tecnologías energéticas y aportar valor a la selección final

Indicador	Disp	Fac	Rel	Tot
Pérdida de biodiversidad	1	1	1	3
Residuos	1	1	3	5
Uso del suelo	2	2	2	6
Inundaciones	1	2	2	5
deslizamiento de tierras	1	1	1	3
calidad del agua	1	1	3	5
ecosistemas	2	2	2	6

Indicador	Disp	Fac	Rel	Tot
Emisiones de GEI	3	3	3	9
calidad del aire	1	1	2	4
Consumo de agua	3	2	3	8
beneficios climáticos	1	1	3	5
áreas protegidas	3	3	3	9
descarga de ríos	2	1	3	6
costos ambientales	1	2	2	5

Indicador	Disp	Fac	Rel	Tot
impacto en la red alimentaria	1	2	3	6
Ocupación del territorio	2	2	2	6
Paisaje	2	2	2	6
Emissiones de ruido de la central eléctrica.	1	1	3	5
Participación de fuentes renovables	3	3	3	9
Participación de generación térmica	1	2	3	6
Generación de contaminantes	3	2	3	8
Costos de operación y mantenimiento	3	3	3	9
Costos de capital e instalación	1	2	3	6
Alta inversión inicial	1	2	3	6
coste del proyecto	1	1	3	5
coste de electricidad-coste de la energía	1	1	1	3
Costos de combustibles	2	1	2	5
costo unitario de electricidad (Precio por kWh)	3	3	3	9
costo nivelado de la electricidad (LCOE)	3	3	3	9
Precio de la generación de electricidad	2	2	3	7
No. de nuevas actividades generadoras de ingresos	1	1	3	5
consumo de electricidad per cápita	2	2	2	6
Consumo eléctrico del sector industrial y comercial	2	2	2	6
tarifas de compensación	1	1	3	5
Proporción de centros de salud y escuelas con electricidad	2	1	3	6
Número de farolas en la zona	1	1	3	5

Indicador	Disp	Fac	Rel	Tot
Reasentamiento/Reubicación/perturbación del espacio vital	1	1	2	4
Creación de empleo	2	1	3	6
recreación	1	1	2	4
Salud humana	1	1	3	5
Nivel de vida	1	1	3	5
Aceptación pública	3	3	3	9
No. De proveedores locales de energía	3	2	1	6
Abastecimiento de agua-Usos del agua	2	2	3	7
Impacto en la población local	2	2	2	6
Tasas de compensación	1	1	3	5
Proporción de población con educación primaria (H/M)	1	1	3	5
Proporción de población con acceso a electricidad (H/M)	3	2	3	8
Existencia de alumbrado público	2	2	3	7
Las cargas de las mujeres se han reducido gracias a la electricidad	1	1	3	5
Capacitación de miembros de la comunidad y operadores locales.	1	1	3	5
Seguridad del uso de la electricidad.	1	1	1	3
Confiabilidad del servicio eléctrico	2	2	2	6
calidad del servicio eléctrico	2	2	2	6
Satisfacción con los costos	3	1	2	6
Estimación de cobertura con la nueva alternativa	3	2	3	8

Indicador	Disp	Fac	Rel	Tot
Independencia de las mujeres	1	1	3	5
Impacto en el valor de la tierra	1	1	3	5
Desarrollo de la economía local	2	2	2	6
Mecanismo de Implementación	2	2	3	7
Modelo de Operación y Mantenimiento (O&M)	1	1	3	5
Capacitación y participación comunitaria	3	3	3	9
Costos externos (salud humana)	1	1	3	5
Aceptabilidad social	2	2	2	6
Riesgo de suministro externo	3	3	3	9
desarrollo regional	1	1	1	3
obstáculo legal	2	1	3	6

Indicador	Disp	Fac	Rel	Tot
Conformidad con las normas nacionales	3	3	3	9
Adaptabilidad del sistema	3	3	3	9
Aumento de la productividad	1	1	3	5
Requerimiento de infraestructura eléctrica	3	3	3	9
Eficiencia energética	1	1	3	5
Funcionalidad del sistema	1	2	3	6
Factor de capacidad	3	3	3	9
Disponibilidad de combustibles	3	2	3	8
Requerimiento logístico y mantenimiento de la tecnología	3	3	3	9

*Disp: Disponibilidad, Fac: Facilidad, Rel: Relevancia,

Tot: Total

Para realizar el filtro de los indicadores aptos para este estudio se crea realiza un enfoque multicriterio simple (ponderación + puntuación), teniendo en cuenta la disponibilidad de los datos, la facilidad de estimación y la relevancia para la decisión, con puntuación de 1-3, y para esto se seleccionan los indicadores con mayor puntuación total, a los indicadores se les asigna diferentes pesos según la importancia

ANEXO D: Encuesta Generada

Importancia de los Principios de Sostenibilidad en la selección de Fuentes de Energías para Leticia y su aceptación.

Introducción

Esta encuesta busca conocer la percepción de diferentes sectores de la población sobre la importancia de los principios de sostenibilidad en la escogencia de fuentes de energía para el municipio de Leticia. La información recolectada servirá de insumo para una tesis de maestría donde se evaluará la sostenibilidad de las opciones energéticas y su viabilidad en la región.

1. Datos Generales:

1.1. Sector al que pertenece:

CorpoAmazonía

Alcaldía

Líderes Indígenas

Comercio u organizaciones empresariales

Líderes Comunitarios

ENAM

Academia (profesores, estudiantes, investigadores)

Sin Afiliación

Otro (Especifique): _____

Sección 1: Conocimiento y percepción sobre sostenibilidad energética

Concepto de sostenibilidad energética:

La sostenibilidad energética es la capacidad de garantizar el suministro de energía a largo plazo sin afectar negativamente el medio ambiente, la economía o la calidad de vida de las personas. Esto implica el uso eficiente de los recursos, la reducción de impactos ambientales y la inclusión de la comunidad en la toma de decisiones. Para evaluar qué tan sostenible es una fuente de energía, se tienen en cuenta criterios ambientales, sociales, económicos, técnicos y políticos, asegurando que se adapte a las necesidades de la región y a su desarrollo futuro.

2. En su opinión, ¿qué tan importante es considerar la sostenibilidad en la elección de fuentes de energía para Leticia?

Muy Importante

Importante

Ni muy importante, ni poco importante

Poco importante

Nada importante

3. ¿Cuál considera que es el mayor desafío energético en Leticia?

Alto costo de la energía

Impacto ambiental de la fuente actual

Falta de acceso equitativo a la energía

Dependencia de combustibles fósiles

Condiciones climáticas y geográficas

Condiciones administrativas para generación de energía

Otro (especifique): _____

Sección 2: Evaluación de los Principios de Sostenibilidad

Los principios son los objetivos más importantes para alcanzar en el desarrollo de una actividad. Para el caso de la sostenibilidad energética, los principios buscan minimizar los impactos negativos y maximizar los beneficios de la producción de energía.

4. A continuación, califique la importancia de cada principio en una escala del 1 al 5:

- 1: Nada importante
- 2: Poco importante
- 3: Ni importante, ni poco importante
- 4: Importante
- 5: Muy importante

4.1. Dimensión Ambiental

	1	2	3	4	5
Prevencción de residuos y contaminación (Minimizar emisiones y desechos)					
Minimización del impacto sobre la biodiversidad (Protección de ecosistemas locales)					
Uso sostenible de los recursos naturales (Aprovechamiento responsable de recursos)					

4.2. Dimensión Social

	1	2	3	4	5
Participación comunitaria e inclusión (Involucrar a la comunidad en decisiones energéticas)					
Accesibilidad y equidad en el suministro de energía (Energía asequible para todos)					
Respeto a la cultura y tradiciones locales (Considerar conocimientos ancestrales en la energía)					

4.3. Dimensión económica

	1	2	3	4	5
Viabilidad económica y sostenibilidad financiera (Costos razonables y estabilidad a largo plazo)					

Generación de empleo y economía local (Fomentar empleos en el sector energético sostenible)

4.4. Dimensión Tecnológica

	1	2	3	4	5
Eficiencia y confiabilidad de las tecnologías (Alto rendimiento y estabilidad en la generación)					
Adaptabilidad a condiciones locales (Adecuación de tecnologías a Leticia)					
Gestión de residuos energéticos (Uso de residuos de manera eficiente)					

4.5. Dimensión Política

	1	2	3	4	5
Alineación con políticas nacionales e internacionales (Cumplimiento de normativas energéticas)					
Transparencia y gobernanza en la gestión energética (Procesos abiertos y participativos)					
Planificación a largo plazo (Estrategias energéticas para el futuro de Leticia)					

Sección 3: Opinión sobre fuentes energéticas en Leticia

¿Qué fuentes de energía considera más viables para Leticia? (Puede seleccionar varias)

- Energía solar fotovoltaica
- Microcentrales hidroeléctricas de pasada (aprovechan el flujo del río o quebrada, no requiere embalses)
- Generación a partir de Residuos Sólidos Urbanos
- Generación a partir de diésel
- Otro:

9. ¿Qué factores considera más importantes al elegir una fuente de energía para Leticia?

Selecciona todos los que correspondan.

Bajo costo de la energía

Reducción del impacto ambiental

Creación de empleo local

Independencia energética

Otro:

10. ¿Tiene algún comentario adicional sobre la generación de energía en Leticia?

Bibliografía

- [1] E. Iltis, “Indicators for assessment of rural electrification-An approach for the comparison of apples and pears,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 7, pp. 2665–2673, May 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.03.023.
- [2] C. K. Ingole, “Sustainability of productive use of off-grid renewable energy: A case of a women’s collective from rural India,” *International Journal of Management and Sustainability*, vol. 12, no. 3, pp. 337–354, Aug. 2023, doi: 10.18488/11.v12i3.3444.
- [3] CMNUCC, “El Acuerdo de París,” <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.
- [4] I. International Energy Agency, “World Energy Outlook 2020,” 2020. [Online]. Available: www.iea.org/weo
- [5] S. Tahseen and B. W. Karney, “Reviewing and critiquing published approaches to the sustainability assessment of hydropower,” Sep. 15, 2017, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2016.09.031.
- [6] L. Stamford and A. Azapagic, “Sustainability indicators for the assessment of nuclear power,” *Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6037–6057, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.08.011.
- [7] K. Hacatoglu, I. Dincer, and M. A. Rosen, “A new model to assess the environmental impact and sustainability of energy systems,” *J Clean Prod*, vol. 103, pp. 211–218, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.050.
- [8] A. Leduchowicz-Municio, A. López-Gozález, B. Domenech, L. Ferrer-Martí, M. E. M. Udaeta, and A. L. V. Gimenes, “Last-mile rural electrification: Lessons learned from universalization programs in Brazil and Venezuela,” *Energy Policy*, vol. 167, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113080.
- [9] H. Lestari, M. Arentsen, H. Bressers, B. Gunawan, J. Iskandar, and Parikesit, “Sustainability of renewable off-grid technology for rural electrification: A comparative study using the IAD framework,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 12, Nov. 2018, doi: 10.3390/su10124512.
- [10] J. A. Ovalle Murcia, “Estado de la Cobertura Eléctrica y las Zonas No Interconectadas en la Región Central,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2020.
- [11] Cepal y Patrimonio Natural, “Amazonia posible y sostenible,” Bogotá, 2013.

- [12] BanRep, “Leticia: Conectora de regiones.” Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-233/leticia-conectora-de-regiones>
- [13] J. E. Roa Barragán and J. C. Caicedo Ulloa, “Viabilidad Técnico – Financiera Para La Generación De Energía Eléctrica, Con Un Sistema Solar Fotovoltaico Interconectado Al Sistema Eléctrico De La Ciudad De Leticia - Amazonas, En El Marco De La Resolución Creg 076 De 2016,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2016.
- [14] IPSE, “Caracterización Energética de las ZNI,” Minminas. Accessed: Sep. 06, 2025. [Online]. Available: <https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-de-las-zni/>
- [15] World Bank, “Energy Overview.” Accessed: Jun. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/overview#3>
- [16] T. Ponomarenko, E. Reshneva, and A. P. Mosquera Urbano, “Assessment of Energy Sustainability Issues in the Andean Community: Additional Indicators and Their Interpretation,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 3, p. 1077, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15031077.
- [17] G. A. C. A. mundiales C. Olade, *Manual de Planificación Energética*, 2nd ed. OLADE, 2017. Accessed: Mar. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.olade.org/publicaciones/manual-de-planificacion-energetica-2017/>
- [18] R. Kyte, “El papel futuro de la iniciativa ‘Energía Sostenible para Todos’ en la promoción de la energía sostenible,” <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-futuro-de-la-iniciativa-energia-sostenible-para-todos-en-la-promocion-de-la-energia>.
- [19] M. Sadiq, P. Kokchang, and S. Kittipongvises, “Sustainability assessment of renewable power generation systems for scale enactment in off-grid communities,” *Renewable Energy Focus*, vol. 46, pp. 323–337, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ref.2023.07.006.
- [20] Instituto de Energía, Kpmg, Kearney, and IEA, “Statistical Review of World Energy 2023 | 72 nd edition,” 2023.
- [21] International Energy Agency (IEA), “Global Energy Crisis,” What is the energy crisis? Accessed: Oct. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis?>
- [22] I. Siksnylyte and E. K. Zavadskas, “Achievements of the European Union countries in seeking a sustainable electricity sector,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 11, Jun. 2019, doi: 10.3390/en12122254.
- [23] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, “Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies,” Jun. 2009. doi: 10.1016/j.rser.2008.03.008.
- [24] International Energy Agency (IEA), “Panorama energético internacional 2023,” 2024. Accessed: Oct. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/data/pdf/A_A2_r_230822.081459.pdf

- [25] M. R. Elkadeem, A. Younes, S. W. Sharshir, P. E. Campana, and S. Wang, "Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: A geospatial multi-criteria analysis," *Appl Energy*, vol. 295, May 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117071.
- [26] A. Leduchowicz-Municio, M. Juanpera, B. Domenech, L. Ferrer-Martí, M. E. M. Udaeta, and A. L. V. Gimenes, "Field-driven multi-criteria sustainability assessment of last-mile rural electrification in Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.114211.
- [27] M. Juanpera, B. Domenech, L. Ferrer-Martí, A. Garzón, and R. Pastor, "Renewable-based electrification for remote locations. Does short-term success endure over time? A case study in Peru," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, May 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111177.
- [28] B. Mainali and S. Silveira, "Using a sustainability index to assess energy technologies for rural electrification," Oct. 10, 2014, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2014.09.018.
- [29] A. Katre, A. Tozzi, and S. Bhattacharyya, "Sustainability of community-owned mini-grids: Evidence from India," *Energy Sustain Soc*, vol. 9, no. 1, Sep. 2019, doi: 10.1186/s13705-018-0185-9.
- [30] A. Heidari, A. Hajinezhad, and A. Aslani, "A Sustainable Power Supply System, Iran's Opportunities via Bioenergy," 2018. doi: 10.1002/ep.12937.
- [31] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, *Sustainability assessment of hydroelectricity*. 2010.
- [32] L. F. Abdulrazak, A. Islam, and M. B. Hossain, "Towards energy sustainability: Bangladesh perspectives," Oct. 29, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.esr.2021.100738.
- [33] J. Li, R. R. Z. Tarpani, L. Stamford, and A. Gallego-Schmid, "Life cycle sustainability assessment and circularity of geothermal power plants," Oct. 29, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.spc.2022.10.027.
- [34] A. Mio, E. Barbera, A. Massi Pavan, A. Bertuccio, and M. Fermeglia, "Sustainability analysis of hydrogen production processes," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 54, pp. 540–553, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.122.
- [35] bp, "Energy Outlook," 2024. Accessed: May 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>
- [36] C. Tatiana, G. Jaime, M. Luis, R. Targelia, S. Katherine, and Y. Marco, *Anuario 2017 Estadísticas Energéticas*. 2017. Accessed: Nov. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.olade.org/publicaciones/anuario-de-estad%EF%BF%BDsticas-energeticas-2017/>
- [37] S. A. Rodríguez Blanco, "Propuesta metodológica basada en vigilancia tecnológica para el desarrollo del marco regulatorio de las fuentes no convencionales renovables

de energía en Colombia. Estudio de Caso.” Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2018.

- [38] S. Arango-Aramburo, J. P. Ríos-Ocampo, and E. R. Larsen, “Examining the decreasing share of renewable energy amid growing thermal capacity: The case of South America,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109648.
- [39] T. Tezer, R. Yaman, and G. Yaman, “Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems,” Feb. 08, 2017, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2017.01.118.
- [40] W. Apichonnabutr and A. Tiwary, “Trade-offs between economic and environmental performance of an autonomous hybrid energy system using micro hydro,” *Appl Energy*, vol. 226, pp. 891–904, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.06.012.
- [41] International Energy Agency (IEA), “Colombia 2023, Energy Policy Review.” Accessed: Jun. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/colombia-2023>
- [42] D. Saina, N. Chandramohanan, and S. Parameswara, *Prospects for Sustainable Development of Kerala State through the Electricity Sector Policy Interventions*. International Conference on Advances in Green Energy, 2014.
- [43] UPME, “Plan Energético Nacional 2020-2050,” 2020.
- [44] IRENA, *Renewable Capacity Statics 2024*. 2024. Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: www.irena.org
- [45] M. Giraldo, R. Vacca Ramírez, and A. Urrego Quintanilla, “Las Energías Alternativas ¿una oportunidad para Colombia?,” 2018.
- [46] Naciones Unidas, “La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una Oportunidad para América Latina y el Caribe,” Santiago, 2018. [Online]. Available: www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- [47] M. Taborda, L. Valencia, D. Montoya, “Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia: Trayectoria, compromisos y contribuciones de la industria,” CIDET. Accessed: Apr. 06, 2025. [Online]. Available: [https://cidet.org.co/innovacion/objetivos-de-desarrollo-sostenible-en-colombia-trayectoria-compromisos-y-contribuciones-de-la-industria/#:~:text=Los%20objetivos%20de%20desarrollo%20sostenible%20son%2017%2C%20los%20cuales%20son,%2C%209\)%20Industria%2C%20innovaci%C3%B3n%20e](https://cidet.org.co/innovacion/objetivos-de-desarrollo-sostenible-en-colombia-trayectoria-compromisos-y-contribuciones-de-la-industria/#:~:text=Los%20objetivos%20de%20desarrollo%20sostenible%20son%2017%2C%20los%20cuales%20son,%2C%209)%20Industria%2C%20innovaci%C3%B3n%20e)
- [48] Dyner et.al., “Hoja de ruta: electricidad 100 % renovable en Colombia a 2030,” Aug. 2022.
- [49] Departamento Nacional de Planeación (DNP), “7. Energía asequible y no contaminante - La agenda 2030 en Colombia.” Accessed: Sep. 06, 2025. [Online]. Available: <https://ods.dnp.gov.co/es/objetivos/energia-asequible-y-no-contaminante>

- [50] R. F. Colmenares-Quintero, G. P. Maestre-Gongora, L. J. Pacheco-Moreno, N. Rojas, K. E. Stansfield, and J. C. Colmenares-Quintero, "Analysis of the energy service in non-interconnected zones of Colombia using business intelligence," *Cogent Eng*, vol. 8, no. 1, Apr. 2021, doi: 10.1080/23311916.2021.1907970.
- [51] Corpoamazonia, Gobernación del Amazonas, PNUD, and MADS, "Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Territorial del Departamento de Amazonas. Proyecto Amazonía Sostenible para la Paz - PNUD," Leticia, 2022.
- [52] CEPAL. UN, "Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial de Colombia," Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo de América Latina y el Caribe. Accessed: Nov. 09, 2023. [Online]. Available: <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/marcos-regulatorios/ley-organica-de-ordenamiento-territorial-de-colombia>
- [53] Parques Nacional Natural (PNN), "Sistema Nacional de Área Protegidas," Políticas y Marco Normativo. Accessed: Nov. 09, 2023. [Online]. Available: <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/es/sistema-nacional-de-areas-protegidas-sinap/politicas-y-marco-normativo/>
- [54] Departamento Nacional de Planeación (DNP), "Instalación celdas solares en zonas no interconectadas," https://proyectostipo.dnp.gov.co/index.php?option=com_k2&view=item&id=136:instalacion-celdas-solares-en-zonas-no-interconectadas&Itemid=213.
- [55] A. Haghghat Mamaghani, S. A. Avella Escandon, B. Najafi, A. Shirazi, and F. Rinaldi, "Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia," *Renew Energy*, vol. 97, pp. 293–305, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.05.086.
- [56] Gobernación del Amazonas, "Plan de Desarrollo Departamental (PDD): Progresando con Equidad," Leticia, 2020.
- [57] Superservicios, "Evaluación Integral de Prestadores de Eenergía para el Amazonas S.A. ESP.," BOgotá, Nov. 2018.
- [58] Alcaldía de Leticia, "Plan de Desarrollo Municipal (PDM) 2020-2023: Juntos por Una Leticia Mejor," 2020.
- [59] M. P. García Cardona and J. A. Silvara Guerrero, "Energías Alternativas en la Amazonía Colombiana," Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, 2018.
- [60] O. Gómez, "Sustitución Actual de Generación de Energía Eléctrica a Base de Diesel a partir de FNCE para San Andrés Islas.," Pontificia Universidad Javeriana, 2022.
- [61] H. Rodríguez, "Formulación de una Propuesta para una Acción de Mitigación Nacionalmente Apropriada (NAMA) para las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia: Informe Final Consolidado Mayo de 2016," May 2016.

- [62] L. C. López Rojas, “Decision methodology for the conceptual design of a sustainable energy supply system for the Leticia campus of Universidad Nacional De Colombia,” Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2022.
- [63] L. N. Cuadrado Castellanos and L. C. Puentes Atuesta, “Establecimiento de la línea base ambiental a partir de la generación de energía eléctrica en el municipio de Leticia en el departamento del Amazonas,” Bogotá, Jan. 2011. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria
- [64] E. A. Borja Guasca and Sergio. Gonzalez Castellano, “Análisis del Impacto Ambiental generado por la Construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en el Municipio de Leticia, Amazonas,” Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2022.
- [65] United Nation (UN), “Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future,” 1987.
- [66] M. Sahabuddin and I. Khan, “Multi-criteria decision analysis methods for energy sector’s sustainability assessment: Robustness analysis through criteria weight change,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101380.
- [67] G. K. Sarangi, A. Mishra, Y. Chang, and F. Taghizadeh-Hesary, “Indian electricity sector, energy security and sustainability: An empirical assessment,” *Energy Policy*, vol. 135, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.110964.
- [68] M. U. Ben-Eli, “Sustainability: definition and five core principles, a systems perspective,” *Integrated Research System for Sustainability Science*, vol. 13, no. 5, pp. 1337–1343, Sep. 2018, doi: 10.1007/s11625-018-0564-3.
- [69] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, and J. H. Zhao, “Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making,” Dec. 2009. doi: 10.1016/j.rser.2009.06.021.
- [70] Iniciativa de las Academias - Universidades, “Pilas con el Futuro,” 2022.
- [71] A. Martínez, S. Valero, and C. Senabre, “Estado del arte de modelos y metodologías de indicadores utilizados para evaluar la sostenibilidad energética de las naciones,” *Técnica Industrial*, vol. 323, pp. 30–40, May 2019, doi: 10.23800/10209.
- [72] S. Mckenzie, “SOCIAL SUSTAINABILITY: TOWARDS SOME DEFINITIONS,” Magill, 2004. [Online]. Available: <http://www.hawkecentre.unisa.edu.au/institute/>
- [73] A. L. G. Lemence and B. C. McLellan, “Social Sustainability Assessment of Energy Systems: Research Status and Opportunities,” in *2024 8th International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2024*, Kyoto: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 223–228. doi: 10.1109/ICGEA60749.2024.10560748.
- [74] W. W. Purwanto and N. Afifah, “Assessing the impact of techno socioeconomic factors on sustainability indicators of microhydro power projects in Indonesia: A comparative

- study,” *Renew Energy*, vol. 93, pp. 312–322, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.02.071.
- [75] E. Ilskog, *Rural Electrification Sustainability Indicators-Manual for Field Workers*. Estocolmo, 2008. [Online]. Available: www.kth.se
- [76] P. Lillo, L. Ferrer-Martí, and M. Juanpera, “Strengthening the sustainability of rural electrification projects: Renewable energy, management models and energy transitions in Peru, Ecuador and Bolivia,” *Energy Res Soc Sci*, vol. 80, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.erss.2021.102222.
- [77] E. Ilskog and B. Kjellström, “And then they lived sustainably ever after?-Assessment of rural electrification cases by means of indicators,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 7, pp. 2674–2684, May 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.03.022.
- [78] I. del Guayo, “The evolution of principles of energy law (a review of the content of the Journal of Energy & Natural Resources Law, 1982–2022),” *Journal of Energy and Natural Resources Law*, vol. 40, no. 1, pp. 43–60, Feb. 2022, doi: 10.1080/02646811.2021.2017650.
- [79] M. Missimers, K. H. Robèrt, and G. Broman, “A strategic approach to social sustainability - Part 2: a principle-based definition,” *J Clean Prod*, vol. 140, pp. 42–52, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.059.
- [80] M. Zimek and R. J. Baumgartner, “Systemic sustainability assessment: Analyzing environmental and social impacts of actions on sustainable development,” *Cleaner Production Letters*, vol. 7, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.clpl.2024.100064.
- [81] F. Fernández-Tirado and C. Parra-López, “DEFINICIÓN Y PRIORIZACIÓN DE CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE BIOCARBURANTES EN ESPAÑA,” 2009.
- [82] Organización de las Naciones Unidas, “United nations division for sustainable development. Expert Group Meeting on Indicators of Sustainable Development ,” Dec. 2005.
- [83] M. G. Carvalho, N. H. Afgan, and M. Jovanovic, “Sustainability Assessment of Solar Energy Systems,” 2004. Accessed: Aug. 28, 2024. [Online]. Available: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [84] H. Meyar-Naimi and S. Vaez-Zadeh, “Sustainability assessment of a power generation system using DSR-HNS framework,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 2, pp. 327–334, 2013, doi: 10.1109/TEC.2013.2253610.
- [85] M. A. Isa *et al.*, “Assessing the sustainable development of micro-hydro power plants in an isolated traditional village west java, indonesia,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 20, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206456.

- [86] B. Atilgan and A. Azapagic, "An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey," *Energy Policy*, vol. 93, pp. 168–186, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.02.055.
- [87] A. Razmjoo, L. Gakenia Kaigutha, M. A. Vaziri Rad, M. Marzband, A. Davarpanah, and M. Denai, "A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area," *Renew Energy*, vol. 164, pp. 46–57, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.042.
- [88] ISO, "ISO 14040:2006(en) Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework," 2006. Accessed: Aug. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:37456:en>
- [89] I. Viole, L. Shen, L. R. Camargo, M. Zeyringer, and S. Sartori, "Sustainable astronomy: A comparative life cycle assessment of off-grid hybrid energy systems to supply large telescopes," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 29, no. 9, pp. 1706–1726, Sep. 2024, doi: 10.1007/s11367-024-02288-9.
- [90] M. Alam *et al.*, "System-level optimisation of hybrid energy powered irrigation system," *Renew Energy*, vol. 234, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121158.
- [91] N. van Dulmen, C. F. B. Rocha, S. Toboso-Chavero, R. Heijungs, and J. Guinée, "Evaluating the landscape of social assessment methods: integrating the social dimension in sustainability assessment of product value chains," *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2025, doi: 10.1007/s11367-025-02432-z.
- [92] R. K. Lukman, V. Omahne, and D. Krajnc, "Sustainability assessment with integrated circular economy principles: A toy case study," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/su13073856.
- [93] Y. Vogt Gwerder, P. Marques, L. C. Dias, and F. Freire, "Life beyond the grid: A Life-Cycle Sustainability Assessment of household energy needs," *Appl Energy*, vol. 255, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113881.
- [94] P. UNEP, *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products*. 2011.
- [95] P. Zhou, B. W. Ang, and K. L. Poh, "A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies," Aug. 16, 2008. doi: 10.1016/j.ejor.2007.04.042.
- [96] B. Lin and H. Long, "A stochastic frontier analysis of energy efficiency of China's chemical Industry," *J Clean Prod*, vol. 87, no. 1, pp. 235–244, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.104.
- [97] S. Soltanian *et al.*, "Exergetic sustainability analysis of municipal solid waste treatment systems: A systematic critical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111975.

- [98] J. Antonanzas, M. Arbeloa-Ibero, and J. C. Quinn, "Comparative life cycle assessment of fixed and single axis tracking systems for photovoltaics," *J Clean Prod*, vol. 240, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118016.
- [99] M. T. Siddique, P. Koukaras, D. Ioannidis, and C. Tjortjis, "A Methodology Integrating the Quantitative Assessment of Energy Efficient Operation and Occupant Needs into the Smart Readiness Indicator," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 19, Oct. 2023, doi: 10.3390/en16197007.
- [100] J. Kitzes, "An introduction to environmentally-extended input-output analysis," Dec. 01, 2013, *MDPI AG*. doi: 10.3390/resources2040489.
- [101] R. Wüstenhagen, M. Wolsink, and M. J. Bürer, "Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept," *Energy Policy*, vol. 35, no. 5, pp. 2683–2691, May 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2006.12.001.
- [102] W. M. O. OMM, "Impactos de El Niño y los cambios climáticos alcanzaron a América Latina y el Caribe en 2023." Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://wmo.int/news/media-centre/el-nino-and-climate-change-impacts-slam-latin-america-and-caribbean-2023>
- [103] DPN and PND, "Bases Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia Potencia Mundial de la Vida." Accessed: Apr. 13, 2023. [Online]. Available: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-03-17-bases-plan-nacional-desarrollo-web.pdf> <https://2022.dnp.gov.co/Paginas/plan-nacional-de-desarrollo-2023-2026.aspx>
- [104] D. N. de P. DPN, "El Plan Nacional de Desarrollo marca la ruta de la transición energética del país." Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.dnp.gov.co/Prensa_/Noticias/Paginas/el-plan-nacional-de-desarrollo-marca-la-ruta-de-la-transicion-energetica-del-pais.aspx
- [105] F. Costa and J. Marengo, "Declaración Sobre la Sequía Amazónica del 2023 y sus Consecuencias Imprevistas," 2023. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00704-w>
- [106] Infoamazonia, "Sequía, deforestación y llamas: la Amazonia vive una 'tormenta perfecta.'" Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://infoamazonia.org/es/2024/11/07/sequia-deforestacion-y-llamas-la-amazonia-vive-una-tormenta-perfecta/>
- [107] IDEAM, "Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia," 2017.
- [108] FINDETER, "Estructuración y formulación de la NAMA de Residuos Sólidos Municipales," 2021.
- [109] Ipse y CNM, "INFORME MENSUAL DE TELEMETRÍA IPSE-GI-F06: BOLETÍN MENSUAL DE OPERACIÓN DE LOCALIDADES CON TELEMETRÍA CNM-IPSE," 2023.

- [110] M. Behzadian, S. Khanmohammadi Otaghsara, M. Yazdani, and J. Ignatius, "A state-of-the-art survey of TOPSIS applications," Dec. 01, 2012, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.eswa.2012.05.056.
- [111] V. Anes and A. Abreu, "Adaptive Cluster-Based Normalization for Robust TOPSIS in Multicriteria Decision-Making," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2025, doi: 10.3390/app15074044.
- [112] I. Khan and Z. Kabir, "Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability assessment," *Renew Energy*, vol. 150, pp. 320–333, May 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.12.132.
- [113] M. M. Ahmadi *et al.*, "A multi-approach framework for developing feasible, viable, and sustainable hybrid energy systems in remote areas: The case of Con Dao island in Vietnam," *J Clean Prod*, vol. 426, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139072.
- [114] M. Claudia Roldán, M. Martínez, and R. Peña, "Scenarios for a hierarchical assessment of the global sustainability of electric power plants in México," 2014, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2014.02.007.
- [115] N. H. Afgan, M. G. Carvalho, and M. Jovanovic, "Biomass-fired power plant: The sustainability option," *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 26, no. 4, pp. 179–193, Dec. 2007, doi: 10.1080/14786450701550434.
- [116] R. Bhandari, L. G. Saptalena, and W. Kusch, "Sustainability assessment of a micro hydropower plant in Nepal," *Energy Sustain Soc*, vol. 8, no. 3, 2018, doi: 10.1186/s13705-018-0147-2.
- [117] A. C. Brent and D. E. Rogers, "Renewable rural electrification: Sustainability assessment of mini-hybrid off-grid technological systems in the African context," *Renew Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 257–265, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.03.028.
- [118] I. Khan, "Power generation expansion plan and sustainability in a developing country: A multi-criteria decision analysis," *J Clean Prod*, vol. 220, pp. 707–720, May 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.161.
- [119] A. Katre and A. Tozzi, "Assessing the sustainability of decentralized renewable energy systems: A comprehensive framework with analytical methods," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/su10041058.
- [120] A. Maxim, "Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis," *Energy Policy*, vol. 65, pp. 284–297, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.09.059.
- [121] L. Stamford and A. Azapagic, "Life cycle sustainability assessment of electricity options for the UK," *Int J Energy Res*, vol. 36, no. 14, pp. 1263–1290, Nov. 2012, doi: 10.1002/er.2962.

- [122] J. K. Musango, A. C. Brent, B. Amigun, L. Pretorius, and H. Müller, “Technology sustainability assessment of biodiesel development in South Africa: A system dynamics approach,” *Energy*, vol. 36, no. 12, pp. 6922–6940, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.09.028.