LOS PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS Y SU APORTE A LA MATRIZ DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN COLOMBIA

HYDROELECTRIC PROJECTS AND THEIR CONTRIBUTION TO THE ENERGY GENERATION MATRIX IN COLOMBIA

MARIO ANDRÉS DAZA VARGAS[1]

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de magíster en Administración (MBA)

Directora: María Cecilia Henao Arango, Ph. D.

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN

MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN (MBA)

MEDELLÍN

2023

[1] adava1@yahoo.es

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 8
JUSTIFICACIÓN 16
OBJETIVOS 17
GENERAL 17
ESPECÍFICOS 17
MARCO TEÓRICO O CONCEPTUAL 18
DISEÑO METODOLÓGICO 55
RESULTADOS 57
CONCLUSIONES 96
REFERENCIAS 97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Capacidad efectiva neta del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y demanda máxima de potencia (MW) entre 2011 y 2020 13
Figura 2. Matriz energética de consumo en Colombia en 2015 21
Figura 3. Distribución porcentual del consumo mundial de petróleo en 2005 22
Figura 4. Esquema de la columna de destilación principal de una refinería de petróleo 23
Figura 5. Consumo porcentual mundial de energía primaria en 2016 27
Figura 6. Dinámica del mercado mundial del carbón en 2012 28
Figura 7. Esquema de sistema de aprovechamiento de energía mareomotriz 43
Figura 8. Cadena de valor del hidrógeno verde 47
Figura 9. Fases del enfoque cualitativo 56
Figura 10. Elementos principales y funcionamiento de una central hidroeléctrica 58
Figura 11. Adiciones de capacidad hidroeléctrica neta global por región 1991 y 2030 61
Figura 12. Capacidad histórica mundial (GW/año) de generación hidroeléctrica 62
Figura 13. Generación de electricidad baja en carbono por tipo de tecnología y participación en el suministro mundial de electricidad en 2020 64
Figura 14. Generación de electricidad baja en carbono por tipo de tecnología en 2020 65
Figura 15. Adiciones de capacidad hidroeléctrica neta global por países líderes entre 2021 y 2030 69
Figura 16. Producción de electricidad por tipo de combustible en los países de América que forman parte de la OCDE en noviembre de 2022 78
Figura 17. Distribución de capacidad efectiva (MW) de energía eléctrica en Colombia el 15 de marzo de 2023 79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Número de proyectos de generación con registro vigente en la UPME por tipo de tecnología……...14
Tabla 2. Calidad y formas de la energía……..19
Tabla 3. Características de tipos de carbón……26
Tabla 4. Composición típica del gas natural refinado……..29
Tabla 5. Producción de dióxido de carbono en gramos por kilovatio-hora de energía producida por las fuentes de electricidad……51
Tabla 6. Principales ventajas y desventajas de las centrales hidroeléctricas de embalse……...71
Tabla 7. Principales centrales hidroeléctricas colombianas por agente operador y por departamento de ubicación……81
Tabla 8. Número de PCH por departamento y capacidad instalada agregada……..84
Tabla 9. Proyectos hidroeléctricos convencionales (sin Hidroituango) vigentes por departamento y su capacidad instalada……..85
Tabla 10. Costo total mundial instalado, factor de capacidad y LCOE por tipo de tecnología renovable en 2020……..94

RESUMEN

La energía ha estado presente durante muchos años con el ser humano y ha sido la base del desarrollo, no solo económico, sino también del bienestar de la población en el planeta. Hoy, cuando el mundo transita por la necesidad de disminuir los efectos nocivos que sobre el medio ambiente se han cernido a través de los años a causa de un desarrollo industrial y económico soportado en la utilización de recursos no renovables, como lo, son las fuentes de energía fósiles convencionales, como el petróleo, el gas natural y el carbón, se hace necesario mucho más el proceso de una transición energética ambiental y socialmente sostenible, pero confiable, a partir de fuentes de energía renovables convencionales y no convencionales que permitan disminuir de manera significativa la huella de carbono y los gases de efecto invernadero.

De acuerdo con lo expuesto, en el presente trabajo de grado se planteó que, si bien se requiere un proceso de transición energética basado en fuentes de energía renovables no convencionales, no se puede perder de vista la necesidad de potenciar la utilización de la fuente de energía renovable más importante que se ha tenido durante muchos años, como lo es la generación de energía a partir de centrales hidroeléctricas convencionales, que tienen una participación del 17% en la generación total mundial de energía y una del 45% en la capacidad de generación de energías renovables en el mundo y que para Colombia son más del 60% de la matriz energética.

Palabras clave: energía, electricidad, hidroeléctricas, desarrollo sostenible, energías renovables y no renovables, transición energética.

ABSTRACT

Energy has been present for many years with human beings and has been the foundation of development, not only economically but also for the well-being of the population on the planet. Today, as the world is facing the need to reduce the harmful effects that have loomed over the environment throughout the years due to industrial and economic development supported by the use of non-renewable resources such as conventional fossil energy sources like oil, natural gas, and coal, it is necessary to further the process of an environmentally and socially sustainable energy transition that is also reliable, based on conventional and unconventional renewable energy sources, which allow for a significant decrease in carbon footprint and greenhouse gas emissions.

Based on the above, this present thesis argues that while an energy transition process based on unconventional renewable energy sources is required, we cannot overlook the need to enhance the utilization of the most important renewable energy source that has been available for many years, which is the generation of energy from conventional hydroelectric power plants. These plants account for 17% of the world's total energy generation and 45% of the global renewable energy generation capacity, and for Colombia, they represent over 60% of the energy matrix..

Keywords: *energy, electricity, hydropower, sustainable development, renewable and non-renewable energy, energy transition.*

INTRODUCCIÓN

La energía hidroeléctrica es la fuente de energía renovable más importante en el mundo y en Colombia ha sido un componente fundamental en su matriz energética durante décadas. Los proyectos hidroeléctricos en el país han tenido un impacto significativo en la generación de energía, no solo en términos de capacidad instalada, sino también en lo referente a la diversificación de la matriz energética y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Este trabajo de grado se enfocó a analizar el aporte de los proyectos hidroeléctricos a la matriz de generación de energía en Colombia. Se examinaron los antecedentes y la evolución histórica de la energía hidroeléctrica en Colombia, así como su importancia actual en la matriz energética del país. Además, se evaluó el impacto ambiental y social de dichos proyectos y se discutieron las oportunidades y los desafíos que enfrenta la industria hidroeléctrica en Colombia. Todo lo anterior se enmarcó en el diagnóstico de la matriz energética de Colombia actual en comparación con de la futura mediante la identificación de los diferentes aspectos que justifican el uso de las generadoras hidroeléctricas convencionales, el impacto en términos de costo respecto de la eficiencia de la generación hidroeléctrica convencional frente a otras fuentes de generación de energía renovables, así como la incidencia de los factores políticos, ambientales y sociales asociados con la ejecución de nuevos proyectos de generación hidroeléctrica convencional.

En última instancia, con la investigación se buscó contribuir al debate sobre la importancia de los proyectos hidroeléctricos en el contexto energético y ambiental de Colombia por medio de la evaluación crítica de su aporte a la matriz de generación de energía del país y su papel en la transición hacia una economía más sostenible.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las fuentes de energía utilizadas en el mundo se concentran, en lo primordial, en los combustibles convencionales fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. Más del del 80% del consumo mundial de energía proviene de estas tres fuentes, mientras que el resto procede de otros tipos de energía como la hidroeléctrica, la nuclear y otras fuentes renovables (Corredor, 2018, p. 112). En el caso de la energía hidroeléctrica, ha contado con el apoyo de entidades y de foros internacionales, como la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, realizada en 2002 en Johannesburgo, Sudáfrica, y el Tercer Foro Mundial del Agua, celebrado en Kioto, Japón, en 2003. En estos escenarios se esbozaron muchas de las bondades de la hidroelectricidad, como las siguientes: es una fuente de energía renovable, viabiliza la utilización de otras fuentes renovables por su flexibilidad operacional, promueve la seguridad energética y la estabilidad de los precios, contribuye al almacenamiento de agua y evita la vulnerabilidad ante desastres naturales causados por las sequías y las inundaciones, además de traer consigo un aumento en la estabilidad y en la confiabilidad del sistema eléctrico. Fuera de lo anterior, la energía hidráulica es conveniente en múltiples aspectos como el equilibrio de la oferta y la demanda del mercado eléctrico mundial, su contribución a la mitigación del cambio climático por la disminución de los gases de efecto invernadero comparada con otras fuentes energéticas, contribuye a desarrollar y a atenuar sus impactos, genera energía limpia con menores costos e incorpora tecnologías más recientes con menores costos de operación y mantenimiento. Por último, los proyectos hidroeléctricos desarrollados y operados de manera sostenible desde los puntos de vista económico, ambiental y de la responsabilidad social aportan al desarrollo más armónico debido a su concepción (Malinow, 2011, p. 5). Por todas las bondades enunciadas países como China, Estados Unidos., Brasil, Canadá y Rusia generan más de la mitad de la energía hidroeléctrica del mundo (Comisión Mundial de Represas, 2000). En casos como el de Estados Unidos, la energía hidroeléctrica es

la principal fuente de energía renovable sin carbono, lo que se fundamenta en varios aspectos: primero, la energía hidroeléctrica es limpia porque no produce altos grados de contaminación del aire ni emisiones sustanciales de gases de efecto invernadero; segundo, la energía hidroeléctrica es muy confiable; tercero, la energía hidroeléctrica ayuda a que Estados Unidos deje de depender de fuentes de hidrocarburos importadas de países políticamente inestables, y cuarto, favorece la integración de la producción hidroeléctrica con la red de protección ambiental (Tarlock, 2012, pp. 1.724-1.725). Muchos países en el mundo han dependido de la hidroelectricidad para el desarrollo de sus necesidades básicas a partir de la energía eléctrica y por ello varios de ellos en Asia, África y América Latina, y otros, como Canadá, están invirtiendo en nuevas centrales de generación hidroeléctrica. El potencial global de energía a partir de hidroeléctricas se estima en alrededor de 150 TWh (teravatio-hora) por año y gran parte del total está disponible en las regiones antes mencionadas; no obstante, una proporción apreciable está por explotar. En cambio, países como los europeos han instalado más de la mitad del potencial hidroeléctrico que tienen. Sin embargo, los grandes proyectos con este tipo de energía con frecuencia enfrentan oposición política, ambiental y social a causa de su impacto en la disponibilidad de agua, la biodiversidad y los recursos naturales, además de la necesidad de reubicar a las poblaciones afectadas.

Entre las principales centrales hidroeléctricas operativas más grandes del mundo se pueden resaltar la de Tres Gargantas, en China, con una capacidad de 22,5 GW (gigavatios), y la de Itaipú, ubicada entre Brasil y Paraguay, que ocupa el segundo lugar con una capacidad de 14 GW y una generación de 98.2 TWh (Robles Algarin y Rodríguez Álvarez, 2018, p. 16). La matriz de consumo de energía de Suramérica muestra como esta región del mundo tiene una matriz más limpia que otras debido a la mayor presencia de la hidroelectricidad, en especial en países como Brasil y Colombia (Corredor, 2018, p. 113). Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Colombia es uno de los países con mayor capacidad hidráulica en el mundo gracias a su caudal disponible, por encima de los 500 m^3/s y un área

aproximada de más de un millón de km^2. Además de lo anterior, se estima que el potencial para pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) es cercano a los 250 MW (megavatios) instalables y hasta la fecha se han construido alrededor de 197 centrales de dicho tipo con capacidad instalada aproximada de 220 MW. En consecuencia, dicho potencial hidráulico no se ha aprovechado al máximo porque en grandes proyectos solo se ha explotado el 8,27% y en pequeñas centrales apenas el 0,67% (Robles Algarin y Rodríguez Álvarez, 2018, p. 13).

La matriz energética de Colombia es muy diferente a la de otros países del mundo y de Latinoamérica debido al peso que en ella tiene la hidroelectricidad. No obstante, y a pesar de lo anterior, el nivel de consumo total de energía en el país depende en gran medida de fuentes convencionales, como el petróleo y el gas (Corredor, 2018, p. 116). Además de lo ya mencionado, y como parte del cambio climático global (CCG), las variaciones en los niveles medios anuales y en la distribución de las precipitaciones en las regiones y en las diferentes estaciones podrían afectar la viabilidad de las centrales hidroeléctricas. Por consiguiente, las regiones en las que las precipitaciones tiendan a disminuir y que tengan alta dependencia de energía generada por centrales hidroeléctricas convencionales podrían requerir una modificación gradual de su matriz por fuentes de energía renovables no convencionales. Asimismo, como las evaluaciones técnicas y económicas de nuevos proyectos hidroeléctricos se basan por lo general en una vida útil de 60 años o más, será necesario revisar el proceso de planeación energética en cuanto a las evaluaciones de capacidad hidroeléctrica potencial (Whittington y Gundry, 1996, p. 40). Un aspecto no menos importante que debe resaltarse en algunos proyectos hidroeléctricos específicos es su contribución al desarrollo multinacional debido a las centrales que se han construido para la generación de energía entre varios países, como lo son las Itaipú y Yacyreta, que aprovechan los recursos naturales de la cuenca del río Paraná y que son de gran relevancia para los sistemas eléctricos de Brasil, Paraguay y Argentina porque se llevaron a cabo con éxito en

sus dimensiones tecnológicas y se encuentran en operación a pesar de los complejos aspectos geopolíticos (Oxilia *et al.*, 2017, p. 6).

El Gobierno nacional, a partir de la crisis energética que condujo al racionamiento de energía de 1992 (Mateus Valencia, 2016, p. 74) ocasionada por el fenómeno de El Niño (Grupo Sura, 2016, p. 34) y agravada por la ineficiencia de las empresas generadoras de energía que eran estatales, además de las dificultades constructivas de la central del Guavio, decidió intervenir el mercado de la generación y la comercialización de energía. En este sentido, logró la expedición de las leyes 142 de 1994, "por medio de la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones" (Congreso de Colombia, 1994a) y 143 del mismo año, "por medio de la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética" (Congreso de Colombia, 1994b), que modificaron y actualizaron las reglas y la estructura del negocio. Ambas normas abrieron las puertas a la operación privada en el sector eléctrico con el fin de desarrollar una estrategia de mercado confiable para la demanda de energía. Además, en el marco institucional se crearon la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)), responsables de proyectar la demanda de las necesidades de transmisión y de generación del sistema eléctrico y del Sistema de Intercambio Eléctrico Nacional (SIN) para la comercialización del mercado a través del Centro Nacional del Despacho, que se transformó años después en XM, que es el administrador y el operador del mercado de energía y gas.

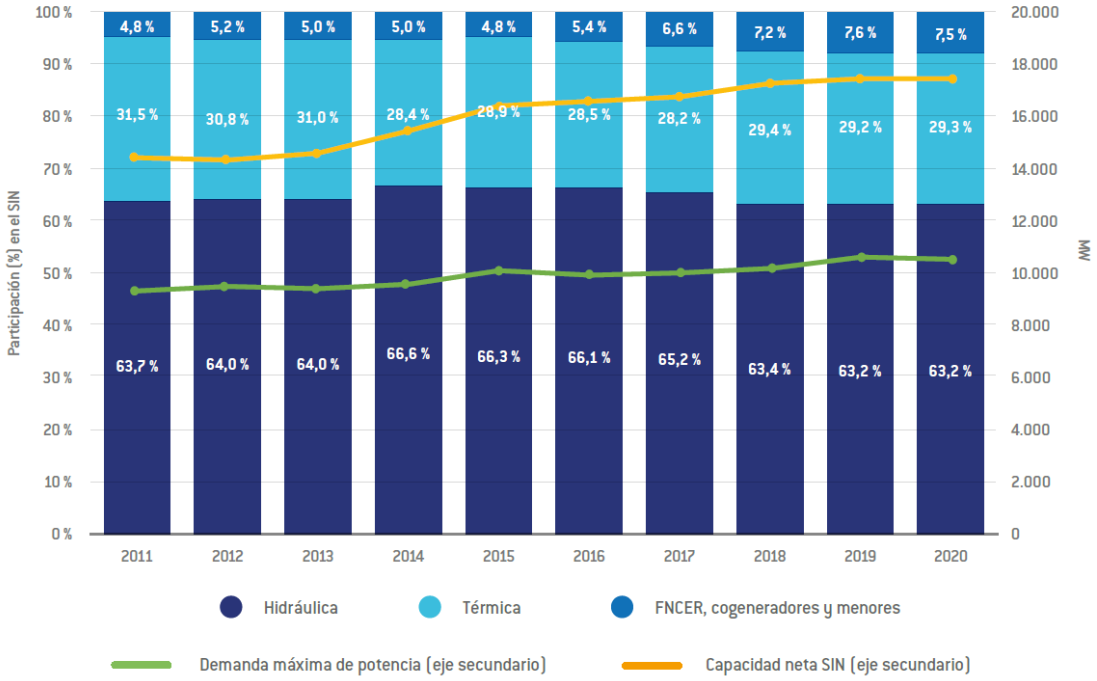
Según el Informe Nacional de Competitividad 2021-2022 (CPC, 2021, p. 128), el perfil de Colombia en materia de energía es muy positivo porque la posición del país en materia de calidad del suministro eléctrico fue la 2 de 17, la de la intensidad energética de la economía, medida por el indicador TJ/PIB en USD) fue la 3 de 17 y la del índice de confiabilidad de la oferta de energía y de transparencia de las

tarifas fue la 5 de 17 frente a los otros países de América Latina. En la figura 1 se muestra, de acuerdo con el capítulo de energía de la misma fuente (CPC, 2021, p. 130), la participación por tipos de generación de energía eléctrica en el país en el período 2011-2020.

De acuerdo con la figura 1, la generación de energía eléctrica en el país depende y ha dependido en un alto grado de la generación hidráulica en el SIN, con una participación del 63,2% del total y una capacidad efectiva de 11.043 MW en 2020. En segundo lugar estuvo la generación térmica, con el 29,3% y 5.122 MW, y, por último, las fuentes no convencionales, los cogeneradores y las plantas menores, con el 7,5% y 1.320 MW el mismo año (CPC, 2021, p. 132).

En UPME (2019a) se presentó la hoja de ruta de la transición energética del país para el período 2019-2050, con fundamento en el Plan Energético Nacional (PEN 2050), cuyo título es “Bases de un modelo energético sostenible al 2050, que garantice nuestra transición energética-transformación energética; buscando el progreso económico y el mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos, sobre la base del respeto al medio ambiente” (UPME, 2019b, p. 22).

Figura 1. Capacidad efectiva neta del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y demanda máxima de potencia (MW) entre 2011 y 2020



Fuente: CNC (2021, p. 132)

Según la mencionada fuente, en 2021 había cerca de 314 proyectos de generación eléctrica registrados ante la UPME en diversas etapas de estructuración, desde los que estaban en estudios iniciales hasta los que habían llegado a los de prefactibilidad y de factibilidad, lo que conlleva una capacidad efectiva de generación de 18.286 MW, que sería suficiente para abastecer el incremento de la demanda de energía hasta el año 2026 (CPC, 2021, p. 133). En la tabla 1 se aprecia cómo los proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER), como los paneles solares fotovoltaicos, que tuvieron el mayor número de iniciativas y acumularon la mayor capacidad de generación, con el 49,3% del total reportado, mientras que la capacidad agregada de generación de los proyectos

hidráulicos y térmicos registrados alcanzó solo el 28,1%. La fuente citada indicó también cómo Colombia es uno de los países de Latinoamérica con menor consumo per cápita de energía eléctrica. No obstante, al evaluar el precio de la energía después de impuestos y transferencias, se constata que se situó en la posición 10 entre 15 países de América Latina en cuanto a mayores costos de la energía para el sector industrial, lo que significa que se ubicó en el promedio.

De igual forma, en la mencionada fuente se muestra cómo un costo mayor de la energía eléctrica conlleva repercusiones negativas en los ingresos de los hogares puesto que gran parte de los bienes y de los servicios utilizados requieren energía para sus labores cotidianas. En la actualidad el país se encuentra en el proceso de una transición energética representada en un alto número (72%) de proyectos con tecnologías de tipo FNCER registrados en el banco de proyectos de generación eléctrica de la UPME que están en las diferentes etapas de implementación (estudio, prefactibilidad y factibilidad) (CPC, 2021, p. 133). Las leyes 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) y 2099 de 2021 (Congreso de Colombia, 2021) promovieron la inclusión de este tipo de tecnologías y contemplaron una serie de incentivos fiscales para la transición energética en el país.

Tabla 1. Número de proyectos de generación con registro vigente en la UPME por tipo de tecnología

Tipo de proyecto	Número de proyectos	% de proyectos	Capacidad (MW)	% de capacidad
Hidráulico	71	22,6 %	2.423	13,3 %
Térmico	5	1,6 %	2.698	14,8 %
Solar	212	67,5 %	9.018	49,3 %
Eólico	25	8,0 %	4.146	22,7 %
Biomasa	1	0,3 %	1	0,0 %
Total	314	100,0 %	18.286	100,0 %

Fuente: CNC (2021, p. 133)

A la luz de lo hasta acá expuesto es necesario no perder de vista los panoramas de mediano y de largo plazo frente la estabilidad del sistema en materia de energía en firme a partir del desarrollo de proyectos hidroeléctricos convencionales, lo que hoy no se ve tan claro debido a las dificultades en materia de licenciamiento ambiental y a los conflictos sociales y políticos que es indispensable enfrentar en este tipo de proyectos. En este sentido, el país requiere de manera prioritaria analizar la posibilidad de viabilizar la construcción de nuevos proyectos de generación, incluidos los hidráulicos convencionales y las PCH, además de finalizar los macroproyectos como el Proyecto Ituango, que le proporcionará al país cerca del 17% de la energía en firme necesaria para la estabilidad del sistema que, si bien hoy se suplen con las fuentes que hoy están en funcionamiento y con los proyectos que entrarían en operación, incluido el antes mencionado a partir 2026, se necesitaría que el país aumente la diversificación de su matriz energética para la atención de la demanda con el fin de evitar así el aumento de los precios de la energía y, por ende, una crisis por la pérdida de productividad y de competitividad del país.

Con fundamento en todo lo anterior se formuló la pregunta de investigación siguiente: con base en las nuevas formas de energía disponibles en la actualidad, ¿cuáles son los aspectos que determinan la necesidad de seguir fomentando el desarrollo de proyectos de generación de energía a partir de hidroeléctricas?

JUSTIFICACIÓN

Los nuevos escenarios en materia de cambio climático y de desarrollo sostenible han conllevado transformaciones drásticas en la generación de energía. El caso de la energía eléctrica no ha sido ajeno a esta situación y el mundo y el país han entrado en un proceso de reconversión o de transición energética de las fuentes convencionales de generación de energía. En el presente trabajo de grado se analizaron y se discutieron los aspectos que determinan la necesidad de los proyectos hidroeléctricos convencionales y su contribución a la matriz energética del sistema, así como al crecimiento competitivo y productivo del país, lo que permitió reflexionar sobre la toma de decisiones de planeación energética que es responsabilidad de los entes gubernamentales nacionales CREG y UPME y de las empresas generadoras de energía.

OBJETIVOS

GENERAL

Analizar la generación de energía en Colombia con el propósito de identificar las variables que justifican el desarrollo de los proyectos de generación hidroeléctrica.

ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar las matrices energéticas actual y futura de Colombia.

2. Identificar los aspectos que justifican el uso de las generadoras hidroeléctricas convencionales como fuentes de energía.

3. Analizar, en términos de costo respecto de la eficiencia y de la efectividad, la generación hidroeléctrica convencional frente a otras fuentes de generación de energía.

4. Determinar la incidencia de los factores políticos, ambientales y sociales asociados con la ejecución de nuevos proyectos de generación hidroeléctrica convencional.

MARCO TEÓRICO O CONCEPTUAL

Energía es una palabra que proviene del griego *energeia*, que significa actividad o fuerza. Según Enríquez Harper y Enríquez Ruiz (2017), es la capacidad de la materia para realizar diferentes trabajos o producir efectos como movimiento, calor y luz a través de distintas formas de energía, tales como la mecánica, la física, la química, la lumínica o eléctrica, y su ejecución conlleva la producción de diversas acciones. En este sentido, la energía es una fuerza fundamental e inmaterial presente en el universo, tal como lo afirmaron Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014).

La energía ha estado en el proceso de desarrollo del mundo durante muchos años y ha sido la base que integra o sustenta las diferentes formas de vida que existen en la Tierra y, además, ha derivado en el bienestar de su población (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 2). Las diferentes fuentes de energía, ya sean renovables o no renovables, se han utilizado para suplir múltiples necesidades de la humanidad durante miles de años: calor, vivienda, alimentación, transporte, comunicaciones, salud, educación y desarrollo tecnológico, entre muchas otras.

La energía está dispuesta de diferentes formas: mecánica, que se puede manifiesta través de la energía cinética y la energía potencial. Los otros tipos de energía son: térmica, química, lumínica, bioquímica, metabólica, eléctrica, eólica, geotérmica, radiante, del mar, acústica, electromagnética y nuclear (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 5).

La energía se puede agrupar por su calidad para ejecutar su trabajo, es decir, si es de alta o de baja calidad. La primera está organizada, concentrada y ordenada para lograr un trabajo útil y la segunda está desorganizada, dispersa y desordenada (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 7).

A continuación se relacionan las diferentes formas de energía según su calidad:

Tabla 2. Calidad y formas de la energía

Calidad de la energía	Formas de la energía
Muy alta	– Electricidad: arco eléctrico a 2500 °C – Fisión nuclear de uranio 235 – Luz solar muy concentrada
Alta	– Calor de alta temperatura (1000-2500 °C) – Hidrógeno – Gas natural (metano) – Gasolina – Carbón – Alimentos
Mediana	– Luz solar normal – Viento con velocidad moderada – Flujo hidráulico de alta velocidad – Energía geotérmica concentrada (>100 °C) – Madera
Baja	– Energía geotérmica dispersa (< 100 °C)

Fuente: Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014, p. 7)

Para satisfacer las diferentes necesidades humanas en la naturaleza hay gran cantidad de recursos materiales y de bienes que se clasifican en renovables y no renovables.

En el mundo actual, la forma de energía más utilizada en diversas actividades cotidianas de los hogares, la industria y muchos otros sectores es la electricidad o energía eléctrica, que proviene de diferentes fuentes que, según su condición, pueden ser renovables o no, de acuerdo con su disponibilidad, su tasa de recuperación y su rapidez de uso o de consumo en el tiempo (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014). En el mundo hoy en día, la mayor parte de la electricidad se obtiene de combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón. Otras

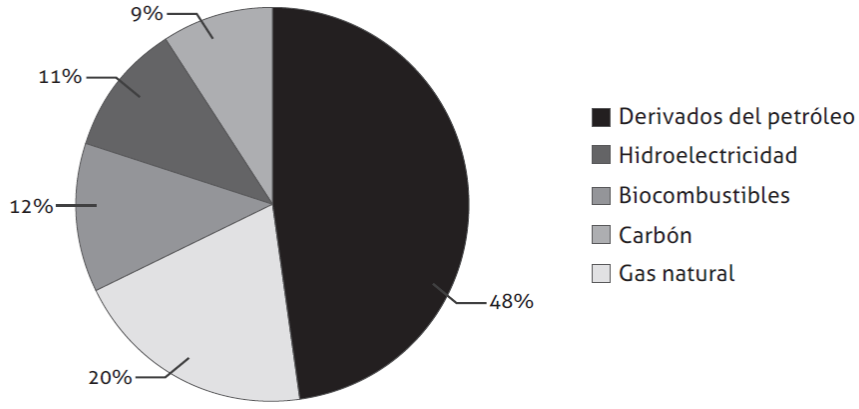
fuentes son la nuclear y las renovables, como las hidroeléctricas y las no convencionales renovables (Enríquez Harper y Enríquez Ruiz, 2018, p. 13).

- **Fuentes no renovables:**

Según Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014, pp. 22, 24), los recursos no renovables provienen de fuentes limitadas o con tasas de regeneración insuficientes para su explotación sostenible, por lo que pueden agotarse con el tiempo. Entre ellos se incluyen los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, así como algunos minerales como el uranio, el cobre y el oro. También está el agua en acuíferos no recargables. De estas fuentes proviene más del 80% de la energía mundial y son la principal fuente de la energía térmica.

Según Corredor (2018), la energía primaria utilizada en el mundo se basa, en lo fundamental, en los combustibles fósiles convencionales, tales como el petróleo, el gas natural y el carbón, que representan el 85,5% del consumo energético global. Por otro lado, la energía nuclear, la hidroelectricidad y las fuentes renovables no convencionales solo representan el 4,5%, el 6,9% y el 3,2%, en su orden. A pesar de ello, Colombia es una excepción debido a la importancia de la hidroelectricidad en su matriz energética, lo que indica una gran diferencia en comparación con otros países. No obstante, en términos de consumo total de energía, el país sigue dependiendo en gran medida de las fuentes de energía convencionales (Corredor, 2018, p. 116).

Figura 2. Matriz energética de consumo en Colombia en 2015



Nota. Elaboración propia con base en UPME (2015a); IEA (2015).

Fuente: Corredor (2018, p. 116)

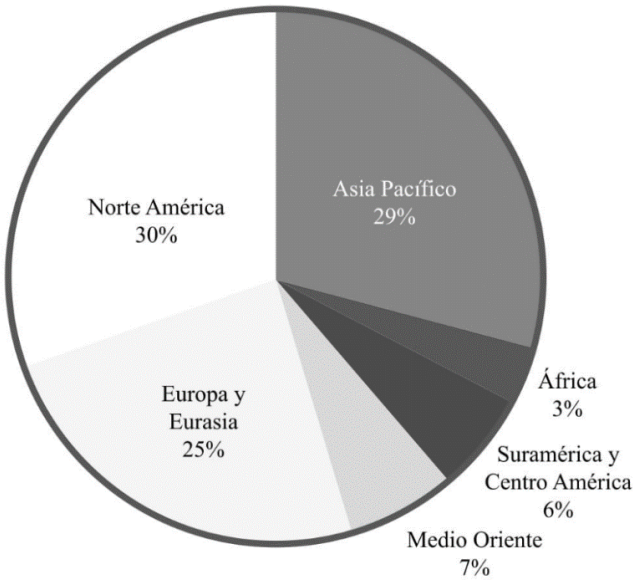
Las energías no renovables se clasifican en dos grandes grupos, según Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014, p. 113): combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, que provienen de procesos geobiológicos muy complejos y de larga duración y que se utilizan para generar energía térmica. Por otro lado están los combustibles nucleares, que aprovechan la energía resultante de la fisión de los núcleos de átomos como los del uranio.

I. Petróleo

El petróleo es una mezcla natural de hidrocarburos y de azufre, níquel, vanadio y otros elementos químicos. En promedio, la composición porcentual del petróleo es carbono (84%), hidrógeno (14%), azufre (entre 1 y 3%), nitrógeno (menos del 1%),

oxígeno (menos del 1%), metales (menos del 1%) y sales (menos del 1%) (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 24).

Figura 3. Distribución porcentual del consumo mundial de petróleo en 2005

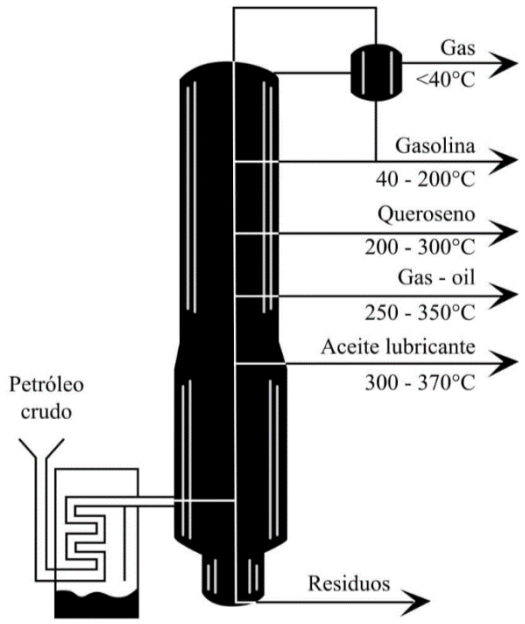


Fuente: Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014, p. 26)

Del petróleo se extrae la gasolina, que se emplea como combustible para el consumo de motores de combustión interna, propios de los automóviles, y el queroseno, que se utiliza usa combustible de los motores de turbinas de los aviones y una menor proporción para la calefacción doméstica e industrial. Otro derivado del petróleo es el gasoil, que se utiliza para los motores diésel de camiones y buses, que también son de combustión interna. Una gran fracción del gasoil, el fueloil o combustóleo, que se emplea como combustible de grandes locomotoras y de generadoras de energía eléctrica. Los residuos sólidos de la destilación del petróleo

constituyen el asfalto, que se usa como pavimento de carreteras (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 26).

Figura 4. Esquema de la columna de destilación principal de una refinería de petróleo



Fuente: Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014, p. 25)

<u>Ventajas</u>:

En un mundo en constante crecimiento, la demanda de energía ha sido siempre un factor determinante para el desarrollo económico. Durante el siglo XX, el petróleo, el carbón y el gas natural fueron los principales recursos energéticos que impulsaron la economía global, gracias a su abundancia y a su alto poder calorífico. Estos recursos permitieron el crecimiento exponencial de industrias como la automotriz, la aviación, el transporte y la tecnología, lo que significó un incremento significativo del

consumo de energía. Sin embargo, hacia finales del siglo XX el mundo tomó conciencia de los efectos ambientales adversos de dichos combustibles y de los riesgos que implican para la supervivencia humana en el largo plazo (Corredor, 2018, p. 109).

En Colombia, los combustibles fósiles también han sido la principal fuente de energía y de ellos depende el 75% de la producción nacional de la energía primaria (Corredor, 2018, p. 117).

Desventajas:

El petróleo tiene grandes desventajas en materia ambiental por la contaminación ocasionada por su extracción, su destilación o refinación y su utilización en sus diferentes formas, que implican la generación de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. De igual manera, y por ser un recurso natural de regeneración extremadamente lenta, menor su producción es mucho menor la velocidad con la que se consume en el mundo: la centésima parte del ritmo como el que se quema (Lovelock, 2011).

El uso de combustibles fósiles en el sector energético, así como los cambios en el uso del suelo, como la deforestación y la agricultura intensiva, son las principales causas de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. El aumento de CO_2 en la atmósfera tiene implicaciones importantes para el clima y la vida en la Tierra puesto que contribuye al calentamiento global y a otros cambios climáticos (Corredor, 2018, p. 110).

Además de los aspectos ambientales, también causa problemas en materia logística y de transporte del petróleo crudo puesto que por la distancia entre las zonas de producción y las de destino debe transportarse por vía marítima, lo que

genera un riesgo a la hora de embarcar, viajar y desembarcar por las posibilidades de derrame, por lo que el grado de afectación está ligado de manera directa con el volumen transportado, o, si el transporte del crudo se da por vía terrestre, se hace a través de oleoductos, lo que conlleva los riesgos debidos a los cambios climáticos y geológicos y al terrorismo, con sus consiguientes daños ambientales (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 27).

Además de los diferentes aspectos negativos de sostenibilidad medioambiental, el precio del petróleo tiene volatilidad elevada. De los combustibles fósiles, el petróleo es uno de los de menor crecimiento mundial actual, lo cual conlleva mayor grado de incertidumbre y mayor volatilidad y cambios en sus precios y contribuye en especial a su encarecimiento (Corredor, 2018, p. 119).

II. Carbón

El carbón es una fuente de energía fósil ampliamente utilizada en todo el mundo. A diferencia del petróleo, que se forma a partir de la descomposición de animales y de plantas, el carbón proviene de la materia orgánica vegetal sometido a altas temperaturas y presiones durante millones de años. Hay diferentes tipos de carbón mineral, como la turba, el lignito, el carbón subbituminoso, el carbón bituminoso y la antracita, que se clasifican según su grado de carbonización y su antigüedad. Entre las principales características que se deben tener en cuenta al utilizar carbón como combustible se encuentran el porcentaje de carbono, la humedad, la materia volátil y el poder calorífico (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 27).

Tabla 3. Características de los tipos de carbón

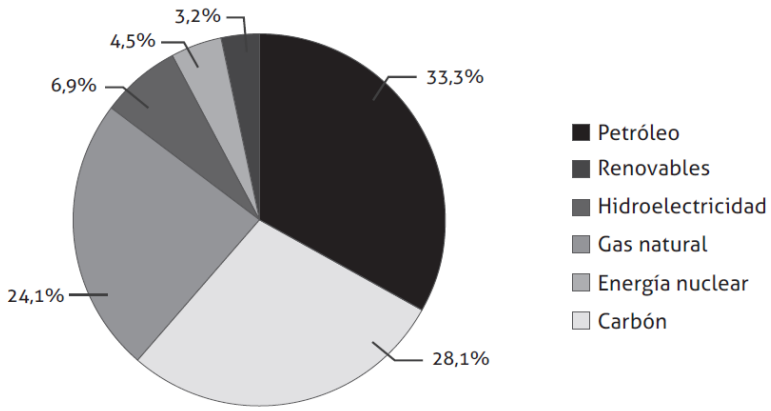
Tipo	Carbono fijo %	Humedad %	Materia volátil %	Poder calorífico KJ/Kg
Antracita	86-98	< 3	< 5	23 000-33 000
Bituminoso (Bajo, medio y alto en volátiles)	45-86	5-10	10-30	24 000-35 000
Sub-bituminoso	35-45	15-30	30-40	20 000-21 000
Lignito	25-42	40-60	40-50	10 000-20 000
Turba	< 25	.....	.....	.....

Fuente: Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014, p. 28)

Según la tabla anterior, la antracita es el carbón de mejor calidad como combustible debido a su mayor grado de carbonización y a su menor contenido de agua y de materia volátil. Asimismo, gracias a su mayor combustión y a su volatilidad, es el carbón que más contamina el medio ambiente.

De acuerdo con Vega de Kuyper y Ramírez (2014), con base en datos de la Energy Information Administration del Department of Energy de Estados Unidos, el consumo mundial de carbón en 2007 fue de 132.10^{15} BTU, equivalente al 27% del consumo mundial total de energía. No obstante, y según Corredor (2018), el consumo mundial de carbón en 2016 había alcanzado consumos del 28,1%, de modo que aumentó su utilización.

Figura 5. Consumo porcentual mundial de energía primaria en 2016



Nota. Elaboración propia con cifras de BP (2017).

Fuente: Corredor (2018, p. 112)

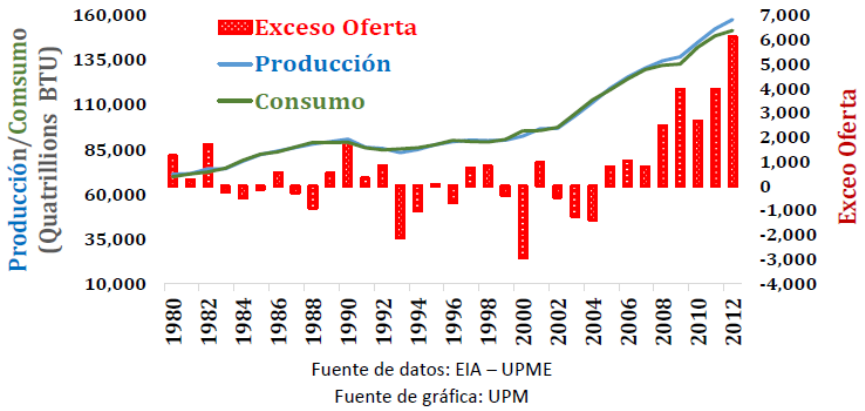
En el caso de Colombia, según Corredor (2018), y como se aprecia en la figura 1, el consumo de carbón en la matriz energética del país en 2015 fue de alrededor del 12% del total de la energía utilizada. El sector industrial es el que más acude a esta fuente energética.

Ventajas:

Según la UPME (2015b), en la última década la oferta en el mercado del carbón aumentó por la disminución del consumo y la desaceleración de los mercados emergentes de alto consumo, como China e India. Además, las regulaciones ambientales cada vez más estrictas en Europa han limitado el uso de este recurso energético. Todo lo anterior condujo a una caída en los precios del carbón en los mercados mundiales. A pesar de este escenario, la industria nacional podría aprovechar esta situación para generar energía de bajo costo mediante la autogeneración y la entrega de excedentes a la red y de esta manera se

aprovecharía la abundancia de carbón de bajo precio que aún está disponible en el mercado.

Figura 6. Dinámica del mercado mundial del carbón en 2012



Fuente: UPME (2015b, p. 74)

<u>Desventajas</u>:

El carbón también tiene grandes desventajas y muchos contradictores en materia ambiental por la contaminación generada por su extracción y por su utilización en sus diferentes formas, por lo que se le considera un combustible sucio debido a sus altas emisiones de humo tóxico con altas concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) lo que conlleva la presencia de enfermedades por su consumo, además de su contribución directa a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y al calentamiento global (Lavelock, 2011, p. 135).

III. Gas natural

El gas natural es una fuente de energía no renovable que se forma a partir de la descomposición de la materia orgánica en procesos que duran millones de años. Se trata de una mezcla de hidrocarburos gaseosos que se encuentran en pozos específicos; aunque en algunas ocasiones acompaña al petróleo, sus mayores yacimientos se encuentran en reservorios específicos. Si bien el gas natural se conocía desde la antigüedad, su explotación y su uso industrial y doméstico no se generalizaron hasta mediados del siglo XX (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 29).

El gas natural está compuesto en su mayoría por metano, acompañado de agua y de gases inertes, como dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2) y helio (He), además del gas tóxico sulfuro de hidrógeno (H_2S) y de los hidrocarburos condensables etano (CH_3CH_3), propano ($CH_3CH_2CH_3$) y butano ($CH_3CH_2CH_2CH_3$). Si se separan los dos últimos y se condensan se obtiene el combustible denominado gas licuado de petróleo (GLP).

Tabla 4. Composición típica del gas natural refinado

Componente	Porcentaje (%)
Metano	93,7
Etano	5,1
Propano	0,03
Butano	0,01
Nitrógeno	1,02
Dióxido de carbono	0,14

Fuente: Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014, p. 29)

Según Corredor (2018), el consumo mundial de gas natural en 2016 fue del 24,1% del total y fue la tercera fuente de energía más utilizada en el mundo, después del petróleo y el carbón, como se muestra en la figura 3. En el caso de Colombia, y de acuerdo con la misma fuente y tal como se aprecia en la figura 1, el consumo de gas natural en la matriz energética del país fue de alrededor del 20% del total de la energía utilizada y fue la segunda fuente de energía del país.

Ventajas:

El gas natural, aunque es un combustible fósil, es biológico en su origen y se ha convertido en una de las principales fuentes de energía en el mundo y en Colombia. Hasta hace algunos años se consideraba uno de los combustibles fósiles más limpios, más eficientes, menos contaminantes y de alta disponibilidad. Fue así como en Europa se logró disminuir las emisiones de dióxido de carbono gracias a su uso (Lovelock, 2011, p. 134). El mundo cada vez está tratando de reducir las emisiones de dióxido de carbono, por lo que los gobiernos y las industrias buscan disminuir en parte su responsabilidad en el calentamiento global y fomentan la utilización de gas natural en lugar de carbón y de petróleo (Lovelock, 2006, p. 116).

El metano, que en promedio constituye entre el 93 y el 94% del gas natural, a diferencia del carbón y de los restantes hidrocarburos que contiene el petróleo, tiene solo un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno en su molécula, lo que conlleva que, para producir la misma cantidad de energía, la combustión del metano produce solo mitad del dióxido de carbono (Lovelock, 2006, p. 117).

Desventajas:

Debido al uso desmedido y al despilfarro de energía, se ha ejercido alta presión sobre las reservas mundiales de gas natural, lo que derivó en el incremento de sus

precios. De igual manera, se identificaron afectaciones al medio ambiente debidas a la filtración de metano en la atmósfera antes de quemarse, fenómeno cuyo efecto de invernadero es veinte veces mayor que el del dióxido de carbono (Lovelock, 2011, p. 134), y otras ocasionadas por las fugas en los gaseoductos que llevan el combustible desde los yacimientos hasta las centrales eléctricas y los hogares. Fuera de ello, el problema mayor de los escapes de metano es que produce 24 veces más gas de efecto invernadero que el dióxido de carbono y que el último compuesto mencionado que queda en el aire porque no se convirtió en vapor de agua, que dura mucho más tiempo y es más difícil de eliminar porque el período de permanencia real puede oscilar entre cincuenta y cien años. Alrededor de la mitad del dióxido de carbono añadido en toda la historia de la humanidad sigue en el aire. Si las fugas de gas natural superan el 2% cada año y llegan al 4%, el efecto de invernadero podría ser tres veces mayor el resultante de quemar carbón (Lovelock, 2006, pp. 117-118).

Lo anterior se agrava debido a que la gran mayoría de gasoductos están en zonas geopolíticamente inestables, lo que impide supervisar de manera directa y satisfactoria la extracción de gas. Además, para un grupo terrorista un gasoducto es un objetivo fácil pues son de longitud considerable y en zonas abiertas y su afectación implica grandes problemas para un país o región. En este sentido, el consumo de gas en lugar incluso del carbón no solo no mejorará las posibilidades de reducir el calentamiento global, sino que lo acelerará (Lovelock, 2006, pp. 118-119).

Según el CPC (2021), Colombia está en desventaja en el uso de gas natural debido a que sus reservas probadas son inferiores a los diez años, lo que pone en riesgo la autosuficiencia energética del país. Esto se vuelve aún más crítico en períodos de baja hidrología porque la generación térmica se vuelve más necesaria para satisfacer la demanda debido a la disminución en generación de energía hidroeléctrica. De acuerdo con la UPME (2020, p. 38), se espera que la demanda de gas natural siga creciendo por el aumento de la población, el crecimiento de la

economía y la sustitución de energéticos menos eficientes. Además, las reservas de gas natural se redujeron en el 4,9% en 2020, lo que deja un horizonte temporal de abastecimiento de 7,7 años y es un grave riesgo para la autosuficiencia energética del país. Por lo tanto, es crucial que Colombia incentive la exploración y la explotación de yacimientos de gas en su territorio para garantizar su seguridad energética en el largo plazo (CPC, 2021, p. 135).

- **Fuentes renovables:**

Según Enríquez Harper y Enríquez Ruiz (2017), las fuentes de energía renovables, como su nombre lo indica, son las que se extraen de recursos o fuentes inagotables por su capacidad de regenerarse por medios naturales. Fuera de ello, se consideran limpias porque no producen contaminación ambiental. En este grupo están las energías generadas por el viento, la luz del sol, las corrientes de agua, las mareas, el calor geotérmico, los biocombustibles y la combustión de biomasa (Lovelock, 2011, p. 136).

I. Energía solar fotovoltaica

Según las leyes 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) y 2099 de 2021 (Congreso de Colombia, 2021), la energía solar es “aquella obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que consiste en la radiación electromagnética proveniente del sol”. Otros autores la denominan la energía cuya fuente principal es el sol. Es una fuente que se utiliza de muchas formas.

Según Lovelock (2011), el sol proporciona 1,35 kilovatios de energía por metro cuadrado de tierra en el que brilla en forma directa. En la actualidad, en países como Colombia, e incluso en el resto del mundo, el porcentaje de participación de la energía solar es muy bajo con respecto a la energía total producida; no obstante, su implementación aumentará de manera significativa el proceso de transición energética. En 2021, de acuerdo con el CPC (2021), 212 (el 62,5%) proyectos de generación con registro vigente ante la UPME fueron solares y su capacidad de generación de energía eléctrica para el país sería de 9.018 MW, es decir, el 49,3% de la oferta subastada.

La generación de la energía solar se logra mediante la utilización paneles fotovoltaicos o celdas solares que capturan la luz del sol y la convierten en electricidad que se almacena en baterías o que se distribuye de manera directa a través de los sistemas de transmisión de energía (Enríquez Harper y Enríquez Ruiz, 2017, pp. 63-64).

Ventajas:

Por ser renovable, la energía solar limpia, conlleva múltiples beneficios en materia de sostenibilidad ambiental pues, en comparación con otros tipos de energías convencionales, como las fósiles, contribuye a la descarbonización de la matriz energética y a prevenir efectos como los de invernadero, el calentamiento global y la lluvia ácida (Enríquez Harper y Enríquez Ruiz, 2017, p. 64).

Entre las bondades de la energía solar destacan su utilización en lugares alejados o remotos, como las zonas montañosas y las desérticas, que son demasiado distantes como para interconectarlos a través de los sistemas de transmisión cableada de las líneas eléctricas. La energía solar ha sido una fuente de energía eléctrica exitosa, en especial para equipos de telecomunicaciones, alumbrados y

equipos electrodomésticos que operan por lo general de forma aislada (Enríquez Harper y Enríquez Ruiz, 2018, p. 214).

Desventajas:

En términos económicos, la generación fotovoltaica tiene desventajas debido a la difícil implementación de su capacidad de grandes volúmenes, así como a la corta vida útil de los paneles solares, cuya dirección es cercana a los diez años. Asimismo, su tecnología dificulta que se lleve o que se le suministre de manera directa a hogares y centros de trabajo, a pesar su desarrollo en las últimas décadas, puesto que siguen siendo muy costosas su fabricación y su implementación (Lovelock, 2006, p. 132). De igual manera, el desarrollo y el funcionamiento de las energías solares, así como sucede con las eólicas, son intermitentes y hasta el presente no se dispone de métodos de almacenamiento apropiados para determinados tipos de sectores y latitudes (Lovelock, 2006, p. 133).

Si bien la descarbonización de la matriz energética es fundamental, no se puede dejar de lado la relación con la parte ambiental de los sistemas fotovoltaicos. Como lo expresa Naranjo Toro (2021) en documento personal compartido con el autor, es importante poner especial atención a la necesidad de exigirles a los fabricantes de los paneles solares que mejoren sus equipos instalados que tienen pocos años de respaldo porque ello conduce a la obsolescencia temprana de los componentes; por ejemplo, un caso es el de las características de los paneles fotovoltaicos ofrecidos por una empresa que opera en la actualidad cuyas celdas tienen 182 mm de espesor y factores definidos de forma y de tamaño y que no garantiza su abastecimiento en los próximos años; si se construye un parque solar con vida útil esperada de 35 años, se necesitarán repuestos de dichos paneles; sin embrago, dado que no estarán en el mercado, la problemática funcional y operacional de la planta se afectará en alto grado. Las situaciones como la planteada se deben mirar con urgencia con el fin garantizar la continuidad operativa para que la incursión en

las plantas de energías renovables no convencionales (ERNC) puedan aportar en forma adecuada a la flexibilidad de la matriz energética y a su descarbonización y no, por el contrario, a conducir a un mayor problema ambiental por la necesidad cambiar una cantidad significativa de componentes y disponer de ellos por su obsolescencia o su incompatibilidad de equipos, como ocurrió en un parque con paneles construidos con celdas de 182 mm y que debieron pasarse a paneles de 210 mm, con las consecuentes dificultades con los arreglos y con los inversores puesto se incrementan los desperdicios y otros problemas ambientales.

La utilización de tecnologías sostenibles, como la solar, se enfrenta a un desafío importante en relación con su intermitencia y su estabilidad debido a la dependencia de las condiciones climáticas, tales como la radiación solar y la velocidad del viento. Además, el exceso de energía que no se aprovecha contribuye a disminuir la eficiencia energética del sistema. Estos factores deben analizarse y tenerse en cuenta a la hora de desarrollar nuevos proyectos que permitan obtener el máximo el potencial de esta fuente de energía y así lograr una transición más efectiva hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles (Muñoz-Fernández *et al.*, 2022, p. 2).

II. Energía eólica

Los vientos se deben a los cambios de temperatura y al proceso repetitivo siguiente: el aire caliente en la línea ecuatorial se desplaza hacia los polos, se generan zonas de baja presión que se enfrían al subir y después, al descender hacia los trópicos, se producen bajas presiones cuando chocan con el aire caliente (Enríquez Harper y Enríquez Ruiz, 2018, p. 57).

Según las leyes 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) y 2099 de 2021 (Congreso de Colombia, 2021), la energía eólica es la “energía que es obtenida a

partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que consiste en el movimiento de las masas de aire" (p. 3). Cuando una masa de aire comienza a moverse, su energía cinética se pone en acción e impulsa su movimiento. Este fenómeno se aprovecha en las turbinas de viento, que convierten la energía cinética mecánica y eléctrica. Las turbinas capturan la fuerza del viento y la transforman en una fuente renovable de energía que se utiliza para alimentar sistemas eléctricos y generar electricidad limpia y sostenible (Enríquez Harper y Enríquez Ruiz, 2018, p. 57).

A partir de las necesidades del mundo de hacer la transición energética de fuentes convencionales no renovables a fuentes no convencionales renovables, la generación de energía eléctrica obtenida en los parques eólicos se ha convertido en una opción para Colombia. En 2021, según el CNC (2021), 25 proyectos de generación con registro vigente en la UPME (el 8%) (25) fueron eólicos, con capacidad agregada de generación de energía eléctrica para el país de 4.146 MW, es decir, el 22,7% de la oferta subastada.

Ventajas:

El viento es una fuente limpia de energía, con emisiones mínimas y que puede usarse en zonas aisladas y en comunidades retiradas de sistemas de interconexión eléctrica (Enríquez Harper y Enríquez Ruiz, 2018, p. 54). Además, la energía eólica tiene alta capacidad disponible en el mundo y Colombia no es ajena a ello. Es así como diferentes estudios identificaron las oportunidades en zonas como La Guajira, en las que los vientos permiten viabilizar una alta probabilidad de convertirse en energía eléctrica puesto que permanecen durante todo el año en la región. La respuesta a la generación eléctrica es positiva, desde el punto de vista técnico, por la posibilidad de obtener flujo de caja (Martínez-Hernández *et al.*, 2021, p. 51).

Desventajas:

Los parques eólicos, a pesar de no generar altas emisiones de CO_2, provocan cambios en el ecosistema por la instalación de grandes hélices en las que las aves podrían lesionarse y de manera eventual disminuir su población. De igual manera, los parques eólicos impactan las comunidades locales, dado el impacto en sus costumbres y en las actividades agrícolas que desarrollan (Martínez-Hernández *et al.*, 2021, p. 51). Además, la construcción de los parques eólicos incide de manera directa en el paisaje y en zonas aptas para cultivos y el ruido de los aerogeneradores contamina el ambiente de las zonas donde se interviene con esta tecnología (Enríquez Harper y Enríquez Ruiz, 2018, p. 54).

Otra desventaja de la generación de energía eólica es la intermitencia de los vientos que implica que, en muchas ocasiones, las turbinas pierdan eficiencia y produzcan energía solo en el 25% de su tiempo. Asimismo, y en términos económicos, es desventajosa en términos de costos frente a otros tipos de energías convencionales. Según Lovelock (2006, p. 128), con base en un informe de 2004 de la Royal Society of Engineers, la energía eólica terrestre europea es 2,5 veces más costosa por kilovatio hora que otras fuentes de energía eléctrica.

La aplicación de tecnologías como la eólica enfrenta un gran desafío frente a otras fuentes de energía eléctrica, como la hidráulica, debido a su falta de estabilidad y a la intermitencia porque depende de diferentes aspectos medioambientales y climáticos, como la radiación solar y las velocidades del viento, además de la pérdida de eficiencia a causa del exceso de energía no aprovechada (Muñoz-Fernández *et al.*, 2022, p. 58).

III. Energía de la biomasa

Según las leyes 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) y 2099 de 2021 (Congreso de Colombia, 2021), la energía de la biomasa es

> aquella energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que se basa en la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos, y que no contiene o hayan estado en contacto con trazas de elementos que confieren algún grado de peligrosidad (p. 3).

La biomasa ha desempeñado a lo largo de la historia un papel destacado como fuente de energía renovable en países en vías de desarrollo y en zonas rurales de escasos recursos, sobre todo a través del uso de leña para la preparación de alimentos y para la iluminación. Aunque el consumo tradicional de biomasa es apenas cercano al 9% del consumo mundial de energía, todas las demás fuentes de energía renovable combinadas, con inclusión de la utilización moderna de bioenergía y de biocombustibles, suman alrededor del 10% (UPME, 2015a, p. 43). En el caso de Colombia, según el CPC (2021), en 2021 solo el 0,3% de los proyectos de generación de energía con registro vigente en la UPME eran de biomasa, con capacidad conjunta de generación de apenas 1 MW de la energía eléctrica subastada. En 2013, alrededor del 1,3% de la electricidad producida en el SIN, equivalente a 804 GWh, provenía del uso energético de bagazo de caña de azúcar. Por otro lado, el empleo de biomasa para la producción de calor en la industria, en lo primordial a través de bagazo, leña, carbón vegetal y otros residuos, como los de palma de aceite y arroz, es cercano al 11% del consumo total de energía final en el sector (UPME, 2015a, p. 44).

Ventajas:

En Colombia, además del uso actual de la biomasa para la generación de energía, hay un potencial significativo para aprovechar esta fuente de energía a partir de los residuos agropecuarios de productos agrícolas como palma, café, maíz, arroz, banano, caña de azúcar y plátano, así como de las industrias pecuarias (porcina, bovina y avícola). Además, hay un importante potencial para desarrollar cultivos energéticos más allá de los actuales cultivos de palma de aceite y de caña de azúcar destinados a la producción de biocombustibles que se debe a la disponibilidad de tierras con vocación agrícola; se estima que hay alrededor de 15 millones de hectáreas con esta vocación que en la actualidad no se destinan a actividades productivas (UPME, 2015a, pp. 44-45).

Desventajas:

La generación de energía basada en la biomasa hasta el momento ha limitado su implementación, en lo fundamental, en el sector azucarero, que cuenta con las condiciones adecuadas y con instalaciones industriales para aprovechar con eficiencia los residuos generados en su proceso productivo. Sin embargo, la materialización de proyectos de generación de energía con biomasa se ha enfrentado a diversas barreras, tales como la falta de nuevas tecnologías en la industria, al conocimiento precario sobre requerimientos y procesos necesarios para la producción y la comercialización de energía eléctrica y a los altos costos de inversión relacionados con el desarrollo de este tipo de proyectos, así como a los aspectos regulatorios que les permitan acceder a la figura de cogenerador (UPME, 2015a, p. 45). Además de lo anterior, para implementar este tipo de proyectos se requerirán grandes extensiones de tierra para la implementación de los cultivos asociados con la producción de dichas energías, lo que riñe con la visión en materia de sostenibilidad ambiental y social (Lovelock, 2006, p. 131).

IV. Energía geotérmica

Según las leyes 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) y 2099 de 2021 (Congreso de Colombia, 2021), la energía geotérmica es la “energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que consiste en el calor que yace del subsuelo terrestre (calor dentro de la tierra)” (p. 3). La energía geotérmica se considera limpia porque no genera residuo alguno y no produce contaminación.

Las centrales eléctricas geotérmicas usan vapor proveniente de pozos geométricos para producir electricidad por medio de turbinas que impulsan generadores eléctricos. Las centrales geotérmicas se construyen por lo general cerca de los pozos de los que proviene el vapor que se bombea a las turbinas (Enríquez Harper y Enríquez Ruiz, 2017, p. 47).

La capacidad instalada mundial de energía geotérmica es de cerca de 11,7 GW y Estados Unidos, Filipinas e Indonesia son los que tienen la mayor capacidad instalada, con 3,4 GW, 1,9 GW y 1,3 GW, en su orden. En América Latina, algunos países, como México, Costa Rica, El Salvador y Nicaragua, también explotan este recurso, con capacidad instalada agregada de alrededor de 980 MW, con algo más de 200 MW cada uno en promedio. La participación de la geotermia es muy alta en la matriz de generación eléctrica de algunos países, como Islandia, Filipinas, El Salvador, Costa Rica y Nueva Zelanda, con alrededor del 14% al 30% en cada caso. Aunque hasta la fecha en Colombia el potencial geotérmico no es significativo, podría desarrollarse en áreas específicas, como son la zona volcánica del nevado del Ruiz y la región de influencia de los volcanes Chiles, Cerro Negro y Azufral, en la frontera con Ecuador, cuyos recursos geotérmicos podrían aprovecharse para la generación de energía con bajos costos de producción y de operación (Haraldsson Ingimar, 2013). Según estimaciones de la UPME (2015a, p. 48), el potencial para el

desarrollo de generación eléctrica a partir de la energía geotérmica en Colombia está en el rango de 1 a 2 GW.

Ventajas:

Colombia cuenta con zonas específicas para la explotación geotérmica, como antes se mencionó, que tienen potencial para aprovechar el recurso en la generación energía con muy bajos costos de producción y de operación.

Otra de las ventajas adicionales de la energía geotérmica es su capacidad para utilizar tecnología similar a la empleada en plantas térmicas basadas en combustibles fósiles, en las que se usan ciclos Rankin y combinados. Sin embargo, a diferencia de las últimas, en la energía geotérmica no se requiere el uso de combustibles para obtener vapor saturado que impulse las turbinas generadoras. En su lugar, se necesita la perforación de pozos en ubicaciones estratégicas en sitios en los que haya reservorios de agua caliente y de vapor generado a partir del calor de la tierra (UPME, 2015a, p. 48).

Desventajas:

Uno de los mayores desafíos o inconvenientes para el desarrollo de proyectos de generación de energía geotérmica radica en los riesgos y los costos asociados en las etapas de exploración, así como en la necesidad de un marco legal adecuado para la gestión de este recurso aún no explotado. La eliminación de estos riesgos a través de regulaciones que se ajusten a la exploración y a la explotación geotérmica es crucial para lograr la concreción de dichos proyectos. Otro obstáculo es el riesgo inherente asociado con la fase exploratoria del recurso, que implica altos costos de inversión, similares a los requeridos en la exploración petrolera. Es necesario destinar grandes sumas de dinero, del orden de 6 a 8 millones de dólares por pozo,

con probabilidades de éxito de apenas el 20%, lo que significa que a la preinversión se le debe destinar una suma del orden de 30 a 40 millones de dólares para determinar la ubicación adecuada para la construcción de un proyecto geotérmico (UPME, 2015a, p. 74).

V. Energía mareomotriz

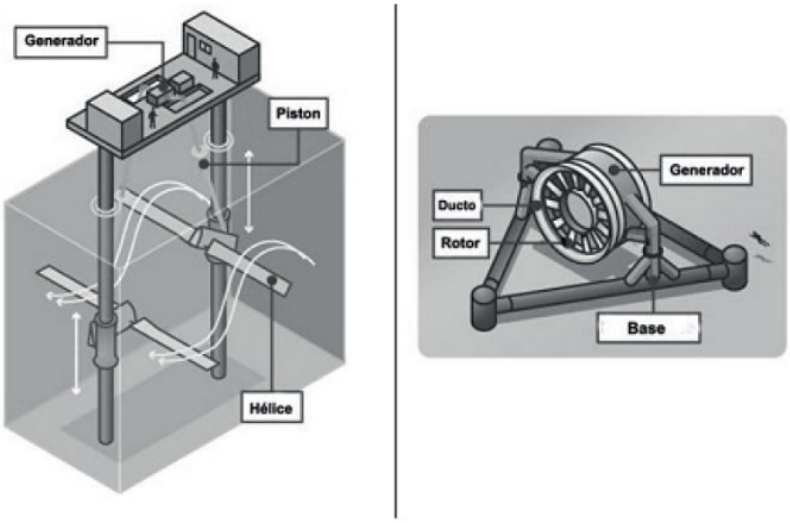
Los océanos y los mares poseen un vasto potencial energético que puede aprovecharse para generar electricidad a través de diversas tecnologías. Entre las alternativas se incluyen la energía de las corrientes, que utiliza la energía cinética de las corrientes marinas mediante la instalación de estructuras submarinas parecidas a aerogeneradores; la energía mareotérmica, que se basa en la diferencia de temperatura entre la superficie del agua y las capas profundas; la energía undimotriz, que aprovecha el movimiento de las olas causado por las corrientes de aire; la potencia osmótica o energía azul, obtenida mediante procesos de ósmosis debido a las diferencias de concentración de sal entre el agua de mar y el agua de ríos, y la energía mareomotriz, que emplea el ascenso y el descenso del nivel del mar generado por las fuerzas gravitatorias del sol y de la luna (Quintero González y Quintero González, 2015, p. 122).

Según las leyes 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) y 2099 de 2021 (Congreso de Colombia, 2021), la energía mareomotriz o energía de los mares es

> aquella energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que comprende fenómenos naturales marinos como lo son las mareas, el oleaje, las corrientes marinas, los gradientes térmicos oceánicos y los gradientes de salinidad, entre otros posibles (p. 3).

La generación de energía resultante del movimiento de las mareas implica la construcción de un dique que permite el almacenamiento del agua, cuyo flujo puede aprovecharse para hacer girar turbinas y generar electricidad, como se muestra en la figura 5. Este tipo de energía ha ganado popularidad en países como Estados Unidos, Francia, China, Canadá, Suiza y Reino Unido, en los que dichos sistemas de producción de energía ya están en funcionamiento y en los que se espera su expansión en el futuro (Quintero González y Quintero González, 2015, p. 122).

Figura 7. Esquema de sistema de aprovechamiento de energía mareomotriz



Fuente: Quintero González y Quintero González, (2015, p. 122)

<u>Ventajas</u>:

El potencial de la energía mareomotriz juega un papel importante en el cumplimiento de los objetivos de las energías renovable en diferentes países de Europa y Asia y en Estados Unidos. Fue así como países como China, debido al rápido desarrollo de su economía y de su sociedad, han impulsado el interés en la aplicación y el

desarrollo de la energía de las mareas por ser renovable y sostenible, lo que permite inferir que dicha fuente de energía, por ser abundante y eficiente en la mencionada región, podría desarrollarse con capacidades de algo más de 20 millones de KW.

En países como Colombia se tienen oportunidades para generar energía a partir de las mareas, tal como se comprobó mediante el cálculo del potencial mareomotriz. Uno de los factores evaluados fue la relación entre la longitud del dique de contención y la energía producida, que es un indicador importante para determinar el costo de instalación. Cuanto menor sea este cociente, más económica será la implementación. Los sitios más idóneos y con potencial para el aprovechamiento de la energía mareomotriz en Colombia son boca Virudó, ensenada de Catripe, bahía Málaga, boca Yarumangui y río Baudó (Quintero González y Quintero González, 2015, p. 126).

La información recopilada de varios estudios elaborados en diversas partes del mundo sugiere que la energía mareomotriz tiene un potencial energético que cumple las expectativas de una fuente de energía alternativa sostenible y limpia, compatible con el medio ambiente y capaz de satisfacer la demanda energética de los países. Esto se evidencia en los proyectos en operación y en desarrollo que han incorporado la energía mareomotriz en las diferentes matrices de generación de varias naciones. Las capacidades instaladas y la producción anual de energía de dichos proyectos también han aumentado en diversas regiones del mundo, lo que destaca la importancia creciente de la energía mareomotriz como un componente clave para el desarrollo económico de diversas regiones (Quintero González y Quintero González, 2015, p. 131).

Desventajas:

El desarrollo de plataformas en aguas profundas para la explotación de recursos oceánicos, entre los que están la energía y el transporte marítimo, entre otros,

puede tener ventajas en términos de tecnología y de aprovechamiento de recursos marítimos en regiones tropicales, subtropicales y mediterráneas. Sin embargo, también conlleva un aumento inevitable en las presiones ambientales sobre los océanos y los ecosistemas marinos. Los estudios realizados en diferentes países han identificado impactos ambientales negativos, como son la reducción del área intermareal, la degradación de la calidad del agua y la destrucción de la vida marina asociados con la construcción de plantas de energía mareomotriz. Además, se han observado efectos significativos en funciones ecosistémicas, como la erosión y transporte de sedimentos, así como la perturbación en los patrones de migración de peces y de mamíferos con fines reproductivos, lo que incrementa el riesgo de colisiones con las infraestructuras de aprovechamiento de energía. Aunque se valora la energía mareomotriz por su contribución a la disminución de la huella ecológica, es importante considerar con sumo cuidado los costos económicos y ambientales antes de su implementación (Quintero González y Quintero González, 2015, p. 130).

VI. Energía a partir del hidrógeno

Tanto el hidrógeno como la electricidad se generan. El hidrógeno se puede fabricar o generar a partir de los diferentes combustibles, como el petróleo, el gas o el carbón, y también puede obtenerse de manera directa del agua mediante electricidad y a partir de la electricidad generada en una central nuclear o en forma directa por medio de la utilización de un reactor nuclear con alta temperatura (Lovelock, 2006).

Los aspectos por resaltar de la generación de energía a partir del hidrógeno son el CO_2 generado y la energía total consumida. La producción de hidrógeno se clasifica en las siguientes cuatro categorías: electrólisis, fotólisis, biólisis y termólisis. El

hidrógeno también se subcategoriza según los tipos de energía que se combinen en el proceso de su generación. La demanda mundial de hidrógeno está satisfecha en un 48% mediante vapor de gas natural reformado, el 30% proviene del petróleo reformado, el 18 %, de la gasificación del carbón y el 4 % de los procesos de electrólisis del agua y de otras fuentes renovables (Castiblanco-Urrego y Milquez-Sanabria, 2021, p. 92).

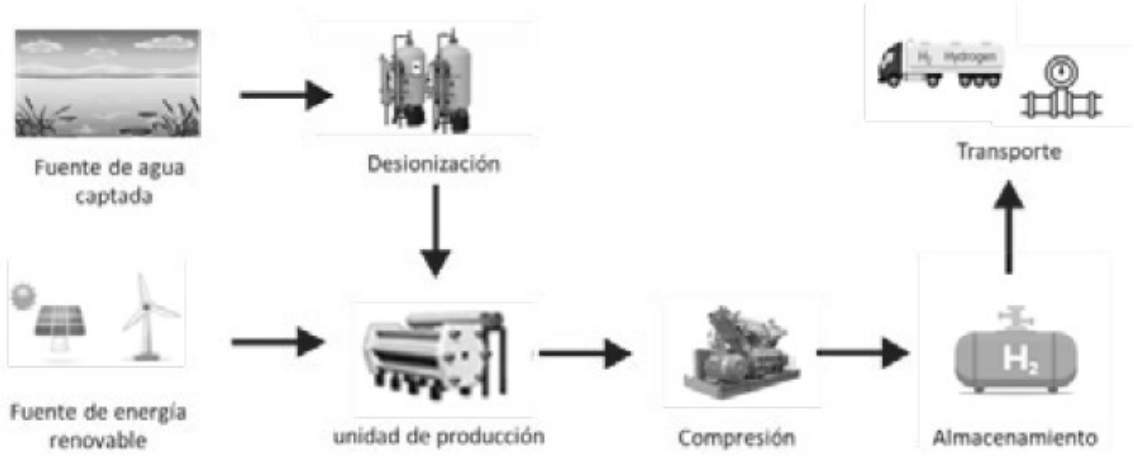
En Colombia, el Gobierno nacional determinó una hoja de ruta para la adopción del hidrógeno como fuente renovable de energía. El plan estipulado para 30 años incluye actividades y metas concretas relacionadas con su producción, su uso y su exportación con el objetivo de contribuir a la descarbonización y a la diversificación de la matriz energética del país (i-deals *et al.*, 2021). La producción de hidrógeno verde obtenido a partir del proceso de electrólisis del agua podría utilizar la infraestructura de generación solar y eólica ya existente en el país, lo que representa una oportunidad para Colombia. Se proyecta que para 2050 el país podría tener el cuarto precio más bajo de hidrógeno verde en el mundo, superado únicamente por China, Chile y Marruecos, lo que destaca su potencial en este mercado. Con base en las oportunidades identificadas, se espera que se adelanten los proyectos piloto de hidrógeno verde, que incluyen los ejecutados por Ecopetrol y otras iniciativas previstas. Hasta 2022 se habían aprobado de por lo menos diez proyectos de producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno como insumo industrial o materia prima, según el CNC (2022, p. 141).

a. Hidrógeno verde

Según la ley 2099 de 2021 (Congreso de Colombia, 2021, p. 2), el hidrógeno verde es “el hidrogeno producido a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable, tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, el calor geotérmico, la solar, los mareomotriz, entre otros; y se considera FNCER”. El hidrógeno verde obtenido mediante el proceso de electrólisis del agua

es un gas limpio con una alta capacidad calorífica. Se le reconoce como el portador de energía proveniente de fuentes renovables que permite el almacenamiento de energía en el largo plazo con mínimas pérdidas para su posterior utilización en la generación de electricidad (Muñoz-Fernández *et al.*, 2022, p. 58).

Figura 8. Cadena de valor del hidrógeno verde



Fuente: (Muñoz-Fernández *et al.*, 2022, p. 59)

b. Hidrógeno azul

La ley 2099 de 2021 o de transición energética (Congreso de Colombia, 2021, p. 2) define como hidrógeno azul "al que se produce a partir de combustibles fósiles, especialmente por la descomposición del metano (CH4) y que cuenta con un sistema de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS), como parte de su proceso de producción" (pág. 2). El hidrógeno azul es el hidrógeno procedente de fuentes fósiles que incorpora el almacenamiento y la captura de emisiones de CO_2 y es una fuente no convencional de energía (FNCE) (i-deals *et al.*, 2021, p. 6).

A partir del hidrógeno gris, que se obtiene a través del reformado o de la gasificación de hidrocarburos, como el gas y el carbón, al aplicarle técnicas de captura, utilización o almacenamiento de CO_2 en dichos procesos, al hidrógeno resultante se le conoce como hidrógeno azul (i-deals *et al.*, 2021, p. 12).

Ventajas:

El hidrógeno comúnmente utilizado en baterías que tienen en un electrodo el combustible y en el otro oxígeno (Lovelock, 2006). Según la misma fuente, uno de los mejores combustibles en el funcionamiento de las baterías es el hidrógeno. Las baterías de hidrógeno son reversibles puesto que pueden utilizar el hidrógeno para quemar electricidad o para producir hidrógeno si se les suministra electricidad (Lovelock, 2006, p. 121). La producción y la utilización de este recurso energético brindan una oportunidad prometedora para países como Colombia, en vista de los avances recientes en la asignación y la construcción de proyectos de FNCER. La infraestructura de estas fuentes podría aprovecharse para la generación de hidrógeno verde. Según informes oficiales, se estima que el país tiene un potencial de generación de energía de hasta 50 GW a partir de este combustible (CNC, 2022, p. 141).

El hidrógeno verde puede ser un combustible importante para la movilidad sostenible, debido a sus mínimas emisiones de dióxido de carbono, para la generación de energía de las industrias o para la refinación de hidrocarburos, lo que conllevaría contrarrestar la huella de carbono.

El hidrógeno azul en países, como Colombia, que disponen de significativas reservas de petróleo, gas natural y carbón, implica una posición cercana a la autosuficiencia en términos de combustibles. Por lo anterior, este tipo de fuentes de energía podrían utilizarse para la producción de hidrógeno azul a través de diversos

procesos, como la captura y el almacenamiento de las emisiones de CO_2 generadas (i-deals *et al.*, 2021, p. 8).

Desventajas:

Es difícil llegar a que el hidrógeno reemplace o sea un sustituto del gas natural en la industria o los hogares. Asimismo, también es difícil en el corto plazo que esta fuente de energía se llegue a distribuir en grandes cantidades como combustible en actividades esenciales, como el transporte, debido a la complejidad de la implementación de la infraestructura requerida para generar, transportar y distribuir hidrógeno en cualquiera de sus formas. Si bien el hidrógeno es una solución para la generación de energía o combustibles, es más costoso e inestable (Lovelock, 2006, pp. 119-120).

El hidrógeno presente en combustibles gaseosos como metano y propano es de difícil manejo, en especial en cuanto a su almacenamiento, puesto que solo se puede hacer con altísimas presiones en contenedores de fibra de carbono o de metal. Además de esto, el hidrógeno mezclado con el aire puede explotar al encenderse, en lugar de quemarse en forma rápida, pero progresiva, como el metano (Lovelock, 2006, p. 41).

La generación de hidrógeno verde presenta mayores costos de producción que la de otras tecnologías o fuentes de ERNC, por lo que depende de su producción en grandes volúmenes para su uso en el largo plazo. Además, el hidrógeno verde tendría su mayor potencial de uso solo en sectores, como el de movilidad, en menor porcentaje se emplearía, mezclado con gas natural, en la producción terminal e industrial y en menor proporción sería posible utilizarlo como una fuente de energía eléctrica (Muñoz-Fernández *et al.*, 2022, p. 59).

En el escenario en que el desarrollo del hidrógeno azul se retrase, el hidrógeno verde podría ser una alternativa directa porque se considera que tiene un mayor potencial de competitividad en el mediano y en el largo plazo. Es importante destacar que la captura y el almacenamiento de CO_2 juegan un papel fundamental en el desarrollo del hidrógeno azul y que un retraso en su implementación podría afectar los plazos de despliegue de esta fuente como una transición hacia el uso del hidrógeno verde (i-deals *et al.*, 2021, p. 41).

VII. Energía nuclear

Hay dos fuentes de producción de energía nuclear. La primera es la fisión nuclear, que se basa en la liberación de energía producida por la división de átomos de elementos pesados, como uranio, torio y plutonio. Este método se utiliza en forma extensa en centrales nucleares de diferentes regiones del mundo, así como en submarinos nucleares. También se reconoce su capacidad de destrucción en las armas nucleares. La segunda es la fisión del núcleo de elementos ligeros, como el hidrógeno y sus isótopos, que tiene el potencial de producir millones de veces más energía que su mera combustión y se considera una prometedora fuente de energía limpia y sostenible para el futuro. En el mundo, en 2011 se tenían más de 400 centrales nucleares que generaban más del 17% de la producción de energía mundial, seguida o en igual porcentaje de hidroelectricidad (Lovelock, 2011, p. 118).

Entre los aspectos que deben destacarse en la producción de energía nuclear es la baja o mínima producción de emisiones de dióxido de carbono. Lo anterior se fundamenta en que la cantidad emitida de CO_2 se debe al transporte necesario para el reparto del combustible y de los residuos (Lovelock, 2011, p. 119).

En la siguiente tabla se relaciona la producción de dióxido de carbono en diferentes tipos de energía según el Informe de la Unidad de Apoyo a la Tecnología Energética del Gobierno del Reino Unido:

Tabla 5. Producción de dióxido de carbono en gramos por kilovatio-hora de energía producida por diversas fuentes de electricidad

Fuente de energía	Número de gramos de CO_2 por kilovatio-hora
Nuclear	4
Eólica	8
Hidráulica	8
Cultivos energéticos	17
Geotérmica	79
Solar	133
Gas	430
Diésel	772
Petróleo	828
Carbón	955

Fuente: Lovelock (2011, p. 119)

En resumen, se podría decir que algunas fuentes de energía, como la nuclear, la eólica y la hidroelectricidad, apenas ensucian o generan residuos de dióxido de carbono en comparación con otras, en especial las que se extraen de combustibles fósiles.

Ventajas:

La energía nuclear de fisión, de no presentar problemas de ingeniería que impidan su desarrollo eficiente y práctico, es una fuente potencial de energía eléctrica; además, es una fuente de generación de energía limpia e inagotable generada por el sol y otras estrellas. Fuera de lo anterior, uno de los combustibles usados es el deuterio, isótopos no radiactivo del hidrógeno, que es ilimitado y accesible y de fácil extracción del agua, y el otro es el tritio, isótopo radioactivo del hidrógeno, que al fusionarse genera energía en forma de partículas energéticas: una de ellas es un átomo de helio y la otra es un neutrón (Lovelock, 2006, p. 136).

Si bien uno de los aspectos que se han considerado negativos de la generación de energía nuclear son los residuos nucleares, en realidad no es lo tanto, según Lovelock (2006). Para ejemplarizar este concepto, el autor expuso cómo, para la misma cantidad producida de dióxido de carbono cada año a través de combustibles fósiles (270 millones de toneladas), la energía nuclear por medio de fisión generaría alrededor de 2 millones de veces menos de residuos. De igual manera, vale la pena mencionar que, para producir la misma cantidad de energía eléctrica con energía nuclear de fusión, se requiere un millón de veces más de gas o de petróleo que de uranio (Lovelock, 2006, p. 139).

En línea con lo anterior, de acuerdo con Lavelock (2022, p. 118), la energía generada en centrales de fisión nuclear tiene indicadores de desempeño que, en términos de seguridad, confiabilidad, costo y aceptabilidad local, las hacen más deseables para incluirlas en la matriz energética.

Desventajas:

En la generación de energía nuclear de fusión se requiere desencadenar una potente reacción del hidrógeno para calentarlo a por lo menos 150 millones de

grados. En ese sentido, uno de los factores que puede ser negativo en la producción de energía nuclear es la generación de residuos tales como el helio porque, a pesar de ser inofensivo y no radioactivo, las partes metálicas del reactor podrían volverse medianamente radioactivas a causa del flujo de neutrones (Lovelock, 2006, p. 135).

Un aspecto no técnico, pero que pesa en sentido negativo sobre la animadversión hacia la energía nuclear, es que se la hubiese utilizado para destruir las ciudades japonesas Hiroshima y Nagasaki en el bombardeo con la bomba atómica por parte de Estados Unidos en la Segunda Guerra Mundial. Además de esto, en los años setenta y ochenta hubo una oposición real a la energía nuclear con protestas contra la guerra de Vietnam una vez se terminó ese conflicto. Es así como surgió la Campaña por el Desarme Nuclear o CND, forma abreviada formada con las iniciales de la expresión en inglés Campaign for Nuclear Disarmament, a finales de los años ochenta, con la que se exacerbó la corriente antienergías nucleares a partir de la entrada del ecologismo y de la CND (Lovelock, 2006, pp. 141-143). De igual manera, la situación presentada por accidentes en plantas nucleares como la de Chernóbil (Ucrania), en la que fallecieron cerca de 75 personas, casi todos trabajadores de la central y del equipo de atención del desastre, incentivaron la satanización de dicho tipo de fuentes de energía (Lovelock, 2011, p. 125).

En 2015 la energía nuclear generó alrededor del 26,5 % de la electricidad de la Unión Europea, de modo que es una fuente de electricidad prioritaria para la mencionada región, al igual que los combustibles fósiles y las energías renovables. Como resultado del accidente de Fukushima (Japón) en 2011, algunos países europeos contemplaron la posibilidad de desmantelar varias de las centrales nucleares dedicadas a la generación de energía eléctrica. Fuera de lo anterior, el incremento de los costos de producción y las mayores inversiones en mantenimiento y seguridad encarecieron la generación de electricidad con la fuente en cuestión y, en consecuencia, la hicieron menos competitiva en comparación con la proveniente de otras fuentes, como la hidráulica. Asimismo, y como es de público conocimiento, los accidentes nucleares influyen de manera significativa en la

opinión pública y conducen a cambios de actitud frente a este tipo de fuente de energía, además de estar asociados con aspectos relacionados, como el aumento de costos, lo que llevó a algunos gobiernos a desmantelar y cerrar las centrales nucleares y a invertir en otras fuentes de energía (EEA, 2017).

Otro aspecto no menos importante que podría limitar la generación de energía nuclear por fisión es la disponibilidad de uranio, que, si bien es abundante y es de fácil extracción, de darse un consumo o una demanda desmedida en el mundo podrían generar agotarse sus reservas (Lovelock, 2006, p. 155).

DISEÑO METODOLÓGICO

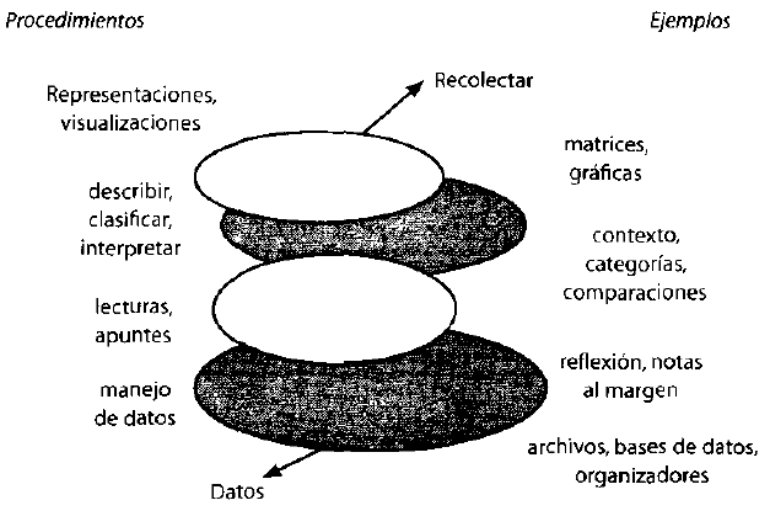
En el presente trabajo se utilizó la metodología con enfoque cualitativo que, de acuerdo con Hernández Sampieri *et al.*, (2014), comprende los pasos establecidos: idea, planteamiento del problema, marco teórico a partir de la literatura existente, concepción del diseño, la elaboración y la contrastación de los datos y su análisis, interpretación de los resultados y conclusiones.

La literatura estudiada incluyó material bibliográfico, como libros impresos y digitales, artículos de publicaciones periódicas generales y de revistas académicas y trabajos de grado que se obtuvieron de la consulta de las bases de datos en línea a las que se accede desde la plataforma Descubridor de la Universidad EAFIT y otras bases externas, como Google Academic. De igual manera, se accedió a información de fuentes secundarias de páginas de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales nacionales e internacionales, normas legales y demás información pertinente para el desarrollo de la investigación.

También se obtuvo información cuantitativa que permitió validar la proveniente de otros métodos de recolección de información (Hernández Sampieri *et al.*, 2014, p. 623), como cifras sobre el costo de la generación de energía por kilovatio-hora, oferta y demanda por fuentes de energía, relaciones entre costo y beneficio de la generación de energía hidráulica y otras fuentes de energía renovables no convencionales, entre otras posibilidades.

La información recolectada se estructuró, se organizó, se analizó y se interpretó para responder en debida forma la pregunta de investigación, según las recomendaciones de Hernández Sampieri *et al.*, (2014, p. 625).

Figura 9. Fases del enfoque cualitativo



Fuente: Hernández Sampieri *et al.* (2014, p. 625)

En el presente trabajo de grado se hizo el respectivo rastreo bibliográfico enfocado al área temática del objetivo general y de los objetivos específicos con las siguientes palabras clave como: energías renovables convencionales y no convencionales, energías limpias, energías no renovables convencionales y combustibles fósiles, entre otras.

De igual manera, se obtuvo información primaria a partir de consultas directas, diálogos y conversaciones con profesionales y directivos de empresas, como EPM, responsables de diversos trabajos y proyectos en el área de la generación de energía eléctrica.

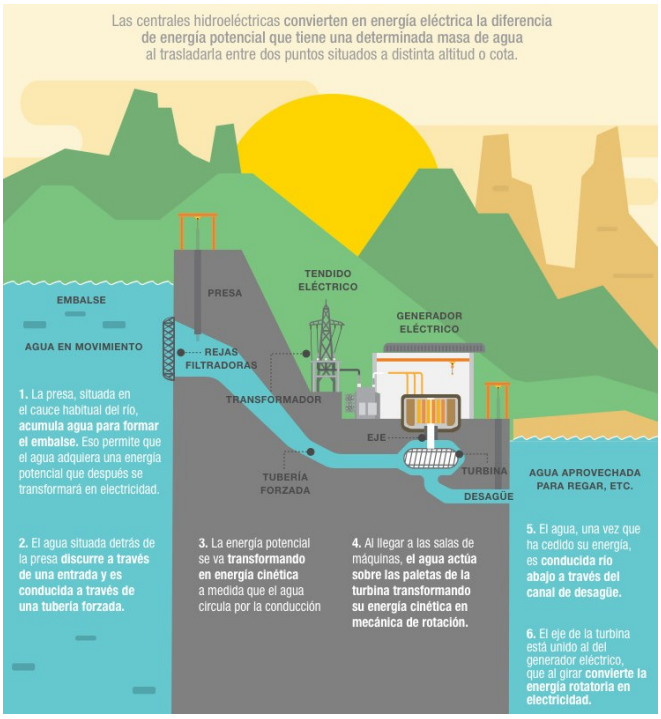
RESULTADOS

LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA:

Las represas nacieron en el siglo XX como uno de los medios más importantes y significativos para viabilizar la utilización de los recursos hídricos. A inicios del siglo XXI, según la Comisión Mundial de Represas (2000), en el mundo había más de 450 grandes represas, que cuales juegan un papel preponderante en el desarrollo de las comunidades y de sus economías a partir del aprovechamiento de los recursos hídricos en la generación de energía, el control de inundaciones y de desastres naturales, la producción de alimentos y el uso doméstico. De acuerdo con la citada fuente, entre el 30% y el 40% de las zonas de riego en el mundo dependen de represas que, a su vez, generan el 19% de la electricidad global.

Mediante el aprovechamiento de represas, el agua se ha convertido en una fuente importante de generación de energía hidroeléctrica obtenida al transformar la fuerza del agua en energía eléctrica a través de infraestructuras hidráulicas de gran envergadura, que maximizan el potencial de este recurso renovable sin emitir gases de efecto invernadero. Las centrales hidroeléctricas (ver figura 11) operan mediante la conversión de la energía potencial del agua, que se encuentra en una altitud o cota específica, en energía eléctrica al trasladarla entre dos puntos con diferentes alturas. El proceso se lleva a cabo mediante la circulación de un caudal de agua a través de un circuito hidráulico en el que aprovecha la diferencia de altura, también conocida como salto, en energía cinética a medida que el agua adquiere velocidad. La turbina es la responsable de convertir la energía cinética en mecánica, que luego un generador transforma en energía eléctrica. Por último, el agua sale de la turbina y regresa al río sin velocidad, pero conserva la energía potencial correspondiente a la altura del punto de descarga (Iberdrola, 2023).

Figura 10. Elementos principales y funcionamiento de una central hidroeléctrica



Fuente: Iberdrola (2023)

Entre los tipos de centrales hidroeléctricas están los tres siguientes:

I. Centrales de agua fluyente o a filo de agua

El funcionamiento de la central se adapta a los caudales que pasan por el río, de modo que no tienen capacidad significativa de almacenamiento y su funcionamiento es continuo, aunque varía a lo largo de los períodos del año, por lo que aprovechan la energía para la producción de electricidad, en lo fundamental, a partir del caudal

disponible del río (Iberdrola, 2023). Estas plantas pueden incluir almacenamiento de corto plazo o estanque, lo que permite cierta flexibilidad horaria o diaria, pero por lo general tienen variaciones estacionales y anuales sustanciales (IEA, 2023b).

II. Centrales de regulación

Las centrales hidroeléctricas de regulación dependen del agua almacenada en un embalse. En este caso, el agua se almacena y su funcionamiento se regula para atender las necesidades de la oferta y la demanda. Su capacidad está determinada por el almacenamiento de agua en el embalse ubicado aguas arriba de la generadora y, dependiendo de su capacidad, se habla del tipo de regulación, ya sea anual, hiperanual o estacional (Iberdrola, 2023), lo que proporciona la flexibilidad para generar electricidad según la demanda y reduce la dependencia de la variabilidad de los flujos de entrada. Los embalses muy grandes pueden retener meses o, incluso, años de caudales medios y también pueden proteger contra inundaciones y utilizarse para servicios de riego (IEA, 2023b).

III. Centrales reversibles o de bombeo

Las plantas de almacenamiento por bombeo utilizan agua que se bombea desde un depósito inferior hasta otro superior cuando el suministro de electricidad excede la demanda o cuando se puede generar con bajo costo. Si la demanda excede la generación instantánea de electricidad y la electricidad tiene un valor alto, se libera agua para que fluya de regreso desde el depósito superior a través de turbinas para generar electricidad (IEA, 2023b).

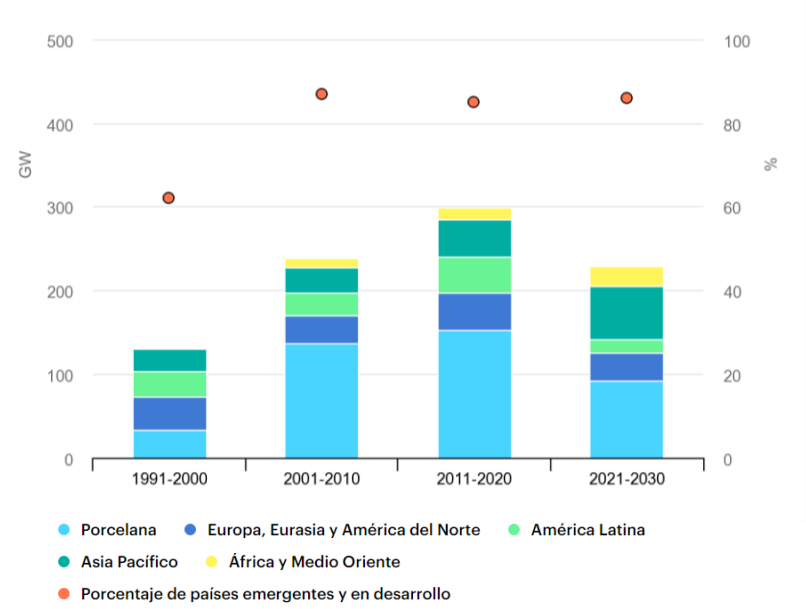
Escenario actual de la hidroelectricidad:

Según la IEA (2023b, p. 9), se espera que

> la energía hidroeléctrica, o hidroelectricidad, siga siendo la mayor fuente mundial de generación de electricidad renovable, y desempeñe un papel fundamental en la descarbonización del sistema eléctrico y la mejora de la flexibilidad del sistema. En este sentido, se prevé que la capacidad hidroeléctrica mundial aumente un 17 %, o sea, 230 GW, entre 2021 y 2030. Sin embargo, se proyecta que las adiciones de capacidad neta durante este período disminuyan un 23% en comparación con la década anterior. La contracción en la generación de energía hidráulica resulta de la desaceleración en el desarrollo de proyectos en países como China, de América Latina y Europa. Sin embargo, el aumento del crecimiento en Asia Pacífico, África y Oriente Medio compensa en parte estos descensos.

De igual manera, la misma agencia también elaboró los pronósticos detallados del mundo hasta 2030 para los tres tipos de energía hidroeléctrica (ver figura 12): embalse, a filo de agua o de agua fluyente y plantas de almacenamiento por bombeo. Las centrales hidroeléctricas de embalse son la mitad de los nuevos proyectos de energía hidroeléctrica hasta el año 2030, las plantas hidroeléctricas de almacenamiento por bombeo son el 30% y la energía hidroeléctrica de centrales a filo de agua o de agua fluyente siguen siendo el segmento de menor crecimiento porque incluye muchos proyectos de tamaño reducido: por debajo de 10 MW (IEA, 2023b).

Figura 11. Adiciones de capacidad hidroeléctrica neta global por región 1991 y 2030



Nota: en porcelana: República Popular de China

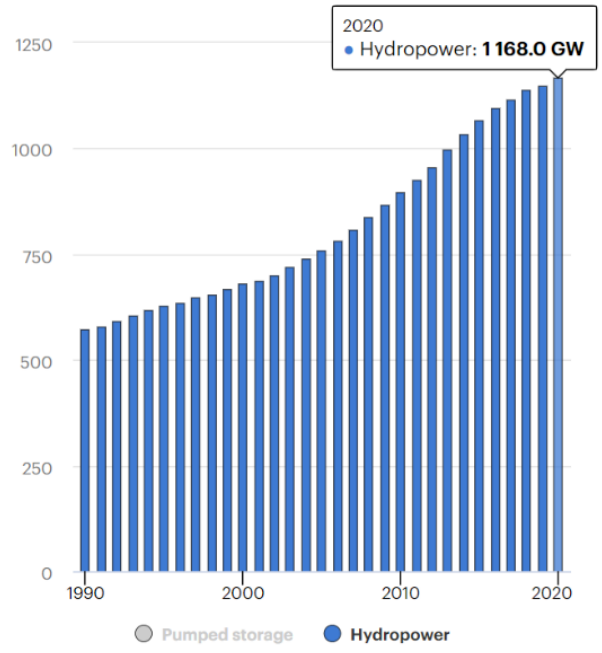
Fuente: IEA (2023a)

Hoy en día la hidroelectricidad, según la IEA (2023b), tienen una participación del 17% en la generación total mundial de energía y una del 45% en la capacidad de generación de energías renovables en el mundo. Asimismo, de acuerdo con la citada entidad hay un potencial económico sin explotar de esta fuente de generación de energía de al menos el 47%. De igual manera, la mencionada agencia proyectó en 31,3 años la edad promedio de las centrales hidroeléctricas instaladas y en funcionamiento en el planeta (IEA, 2023b).

Las economías emergentes y en desarrollo han liderado el crecimiento mundial de la energía hidroeléctrica desde la década de 1970, sobre todo a través de

inversiones del sector público en grandes plantas de generación. Hoy en día, la energía hidroeléctrica satisface la mayor parte de la demanda de electricidad en las mencionadas economías, con población cercana a los 800 millones de personas, y ha proporcionado una forma rentable de ampliar el acceso a la electricidad. Sin embargo, en las economías avanzadas, la participación de la energía hidroeléctrica en la generación de electricidad ha disminuido y las plantas están envejeciendo. En América del Norte, la planta hidroeléctrica promedio tiene casi 50 años y en Europa 45 años. Dichas centrales que ya hoy se encuentran muchas envejecidas, proveyeron electricidad renovable asequible y confiable bajo demanda durante décadas, pero necesitan modernizarse para garantizar que sigan contribuyendo a la seguridad eléctrica de manera sostenible en las próximas décadas (IEA, 2021, p. 7).

Figura 12. Capacidad histórica mundial (GW/año) de generación hidroeléctrica



Fuente: IEA (2021a)

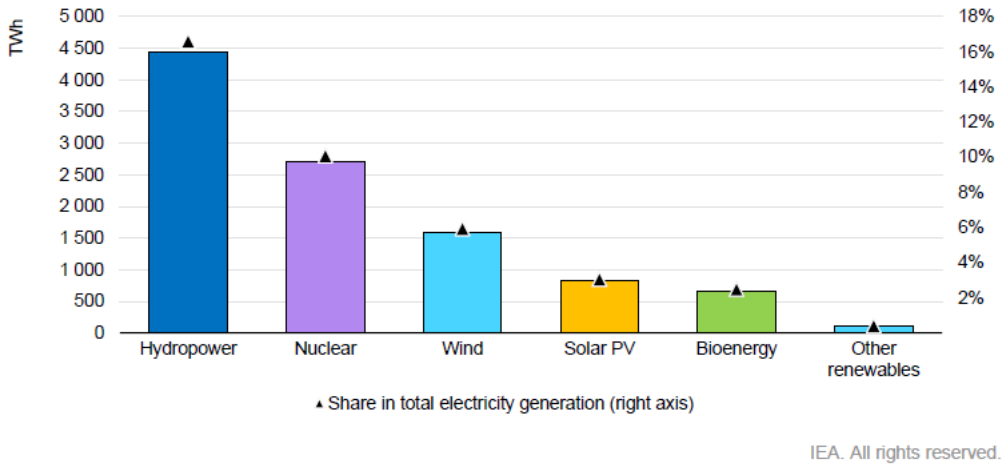
Es importante resaltar cómo la capacidad total mundial de la energía hidroeléctrica aumentó en los últimos 20 años en un 70%; no obstante, se mantuvo estable su participación en la generación total debido al crecimiento de otras fuentes de energía, como la solar fotovoltaica, el carbón, la eólica y el gas natural (IEA, 2021, p. 7).

Ventajas de la energía hidroeléctrica:

Como lo mencionó el doctor Fatih Birol (2021), director ejecutivo de la IEA, “la energía hidroeléctrica es el gigante olvidado de la electricidad limpia, y debe volver a colocarse de lleno en la agenda energética y climática si los países se toman en serio el cumplimiento de sus objetivos de cero carbono” (p. 2). Además, destacó la alta contribución de la energía hidroeléctrica a la transición energética a partir de fuentes limpias, que no se limita a la elevada cantidad de energía eléctrica renovable que produce, sino también a su capacidad para proporcionar flexibilidad y disponibilidad en la matriz energética mundial, lo que la convierte en un habilitador natural para integrar mayores cantidades de energías eólica y solar (IEA, 2021, p. 2).

La energía hidroeléctrica se ha convertido en la columna vertebral de la generación de electricidad limpia con emisiones de carbono bajas y es casi la mitad de ella (45%) en todo el mundo. Su contribución es un 55% mayor que la de la energía nuclear y superior a todas las demás energías renovables combinadas, como son la eólica, la solar fotovoltaica, la geotérmica y la bioenergía. En 2020, la energía hidroeléctrica suministró el 17% de la generación de electricidad mundial, la tercera fuente más grande después del carbón y del gas natural (IEA, 2021, p. 7).

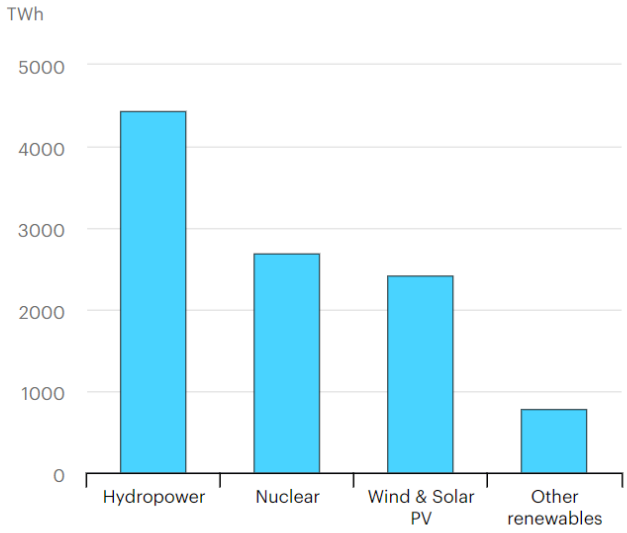
Figura 13. Generación de electricidad baja en carbono por tipo de tecnología y participación en el suministro mundial de electricidad en 2020



Fuente: IEA (2021, p. 16)

Las centrales hidroeléctricas también contribuyen de manera importante a la flexibilidad y a la seguridad de los sistemas eléctricos. Muchas centrales hidroeléctricas pueden aumentar y disminuir su generación de electricidad con rapidez mucho mayor que la de otras centrales eléctricas como las nucleares, las de carbón y las de gas natural, así como también pueden detenerse y reiniciarse con relativa facilidad. La flexibilidad inherente de la energía hidroeléctrica permite una rápida adaptación a los cambios en la demanda y la capacidad de compensar las incertidumbres en el suministro de otras fuentes de electricidad. Esto la convierte en una opción importante para respaldar la implementación y la integración segura de otras fuentes de energía eléctrica renovables en los sistemas correspondientes, como la solar fotovoltaica y la eólica (IEA, 2021, pp. 7-8).

Figura 14. Generación de electricidad baja en carbono por tipo de tecnología en 2020



Fuente: IEA (2022b)

También es importante resaltar cómo en el mundo el potencial de la energía hidroeléctrica sin explotar es más de la mitad del potencial económicamente viable. En las economías emergentes y en desarrollo dicho potencial es especialmente alto y alcanza cerca del 60%. En el ciclo de vida de una central de energía hidroeléctrica, las emisiones de gases de efecto invernadero son más bajas por unidad de energía generada que las de otras fuentes de generación de energía, incluso las renovables, de modo que son mayores sus beneficios ambientales (IEA, 2021, p. 8).

Las políticas energéticas de cada país pueden brindar mayor certeza sobre los ingresos futuros de las generadoras, lo que reduce los riesgos de inversión y garantiza la viabilidad económica de los proyectos hidroeléctricos. Desde la década de 1950, más del 90% de las centrales hidroeléctricas se han desarrollado en condiciones que brindan certeza de ingresos a través de garantías de compra de energía o de contratos de largo plazo. La visibilidad de largo plazo de los ingresos,

en especial para proyectos hidroeléctricos de gran tamaño con períodos amplios de entrega, reduce de manera significativa los costos de financiamiento y aumenta la viabilidad del proyecto, lo que facilita la inversión. Esto es de particular importancia cuando el sector privado está involucrado (IEA, 2021, p. 8).

En el caso de Colombia, la energía hidroeléctrica es una de las fuentes de energía más importantes y que tiene bondades también en materias ambiental, social y económica. En cuanto a los primeros, conviene destacar cómo la generación hidroeléctrica es la mayor fuente de energía renovable en la matriz colombiana (más del 60%) y, por ende, entre sus bondades está la de no emisión de gases de efecto invernadero, ni otros contaminantes atmosféricos, lo que la convierte en una fuente de energía limpia por encima de las otras que hay en la matriz. Además, los embalses de las centrales hidroeléctricas no solo sirven para el almacenamiento de agua para la generación hidroeléctrica, sino que también se utilizan como reservorios y mejoradores de la calidad del agua, por lo que propician el hábitat para la fauna y flora y actúan como reguladores y controladores de inundaciones y de los restantes desastres naturales que pudiesen suceder por aumento de los cauces de los ríos represados (Comisión Mundial de Represas, 2000, p. 100). Además de lo anterior, a partir de la ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993) y de todas las demás herramientas con que cuenta el Gobierno colombiano para el cuidado del medio ambiente en el desarrollo de los diferentes proyectos que utilizan recursos naturales, los proyectos hidroeléctricos han traído consigo el establecimiento y la recuperación de miles de hectáreas de bosques para compensación y protección; tal fue el caso de empresas como EPM, que hasta 2021 y en la ejecución del proyecto Hidroeléctrico Ituango adquirió más de 19.000 hectáreas como compensación y para protección de su área de influencia (EPM, 2022).

En cuanto a lo social en Colombia, los proyectos en construcción y la operación de centrales hidroeléctricas han contribuido de manera directa y sostenida durante muchos años al desarrollo local y regional por medio de la creación de una cantidad significativa de empleos de calidad en la construcción y la operación de las centrales

hidroeléctricas; además, trajeron consigo la dinamización de las economías regionales debido a los ingresos provenientes del comercio de bienes y servicios. De igual manera, y en materia de gobernanza e institucionalidad, se han llevado a cabo acuerdos con las gobernaciones y las alcaldías de las zonas en las que se desarrolla la construcción de proyectos o la operación de centrales hidroeléctricas, que son programas de responsabilidad social empresarial que han permitido la construcción y el mejoramiento de infraestructura social y comunitaria en aspectos como vías, hábitat, educación, salud, promoción del desarrollo cultural y deportivo y fortalecimiento social y comunitario, entre otros (EPM, 2022).

Desventajas de la energía hidroeléctrica:

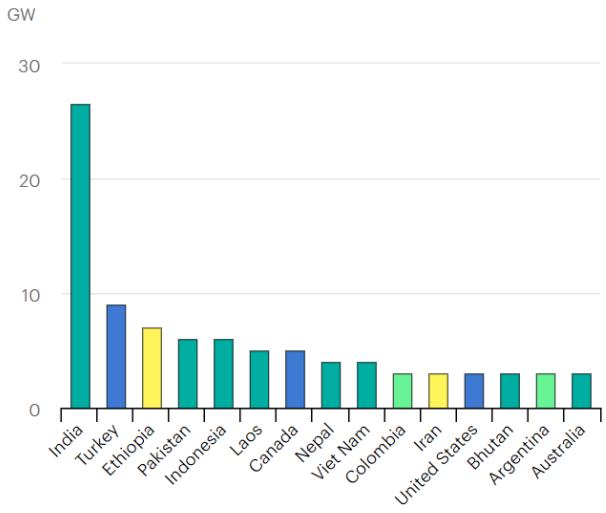
Los estados juegan un rol fundamental para asegurar que la energía hidroeléctrica se desarrolle de forma sustentable mediante la implementación de políticas de y procesos de sostenibilidad que generen confianza en los inversionistas y respaldo de las poblaciones en las que se ejecuten los correspondientes proyectos. En la actualidad, los estudios de impacto ambiental para la planeación y el desarrollo de centrales hidroeléctricas se han vuelto demasiado largos en tiempo y en costos y con alta incidencia de riesgos sociopolíticos, lo que está desincentivando la inversión en dicho tipo de proyectos. En este sentido, es fundamental que los proyectos hidroeléctricos tengan esquemas de ejecución claros y aceptados con suficiente amplitud en materia de sostenibilidad, de modo que se favorezca su viabilidad técnica, social y ambiental. Garantizar el cumplimiento de la normatividad de cada país en materia ambiental, así como llevar a cabo mejores prácticas en los proyectos hidroeléctricos conlleva la mitigación de los riesgos en materia de sostenibilidad y la maximización de los beneficios sociales, económicos y ambientales, no solo para los inversionistas y los gobiernos, sino también para las comunidades locales en las que se implementan. Las dificultades señaladas en los países desarrollados han conducido a desestimular la construcción y la operación

de nuevas centrales hidroeléctricas, a lo que se le agregan asociado también otros factores, como la caída de los precios de la electricidad y la falta de certeza de los ingresos en el largo plazo (IEA, 2021, p. 8).

En el mundo se prevé una disminución cercana al 23% de la capacidad instalada, así como de la construcción de nuevos proyectos hidroeléctricos durante el período de 2021 a 2030 en comparación con la década anterior. Este efecto proviene, en proporción significativa, de la desaceleración económica de China, Europa y América Latina. Sin embargo, el aumento en el crecimiento económico de otras economías, como las del resto de Asia, Oriente Medio y África han compensado en parte la mencionada desaceleración (IEA, 2021, p. 9).

De igual manera, cerca del 45% de la capacidad total instalada de centrales de generación hidroeléctrica está envejecida, por lo que es fundamental su modernización para mantener el suministro de energía de manera confiable, estable y flexibles en cada uno de los países. No obstante, el gasto proyectado en las centrales existentes no es suficiente para satisfacer las necesidades de modernización de la capacidad instalada mundial de hidroeléctricas; en este sentido, la disponibilidad limitada de los ingresos en el largo plazo y las importantes inversiones necesarias para modernizar las centrales pueden dificultar la obtención de la financiación necesaria para llevar a cabo la modernización (IEA, 2021, p. 11).

Figura 15. Adiciones de capacidad hidroeléctrica neta global por países líderes entre 2021 y 2030



Fuente: IEA (2022a)

En el caso de Colombia, entre las principales desventajas que se pueden presentar o se han presentado en la ejecución de los proyectos para la construcción de las centrales hidroeléctricas en materia ambiental, social y económica se detallan a continuación.

Los impactos ambientales de la generación de energía hidroeléctrica están asociados en gran medida con la construcción de estructuras como las presas y todas las estructuras subterráneas, que degradan el medio físico y biótico por la pérdida de hábitats naturales, lo que afecta de manera directa la biodiversidad y la calidad del agua. Además, las emisiones de gases de efecto invernadero de las centrales pueden contribuir al cambio climático. De igual manera, la construcción de infraestructuras en zonas superficiales y la utilización de gran cantidad de áreas destinadas al vaso del embalse en represas de acumulación ocasionan la deforestación y la pérdida de suelos, lo que incide en sentido negativo en la calidad

del aire y en la disponibilidad de agua. En materia social, el impacto está ligado en forma directa con la construcción de los proyectos hidroeléctricos debido a la reubicación o al reasentamiento de las poblaciones locales ubicadas en sitios en los que se construirá la infraestructura necesaria para la operación de la central (presa, vertedero, casa de máquinas y túneles, entre otros aspectos), así como con las áreas requeridas para el embalsamiento del agua, sobre todo en represas de acumulación, lo que conlleva un impacto en las comunidades situadas en los respectivos territorios; no obstante, los procesos de reubicación y de reasentamiento se hacen según las condiciones y las normas vigentes, no solo nacionales, sino también internacionales, que buscan que la calidad de vida de los pobladores reasentados sea mejor que las condiciones anteriores a la construcción del proyecto hidroeléctrico. Asimismo, las poblaciones pueden verse afectadas por la pérdida de la calidad de vida en general debido a impactos en materia social y cultural asociados con la presencia de un mayor número de pobladores foráneos es sus comunidades, fenómeno que se denomina presión migratoria. De igual manera, y si bien durante la época de construcción de los proyectos hidroeléctricos se propicia la vinculación de numerosa mano de obra de las zonas en las que se construyen, cuando se finalizan los proyectos se reduce en forma sustancial la mencionada vinculación laboral, lo que genera procesos de pérdida de capacidad adquisitiva de la población y, por ende, deterioro de su calidad de vida. Con el fin de mitigar los efectos adversos y de administrar la situación social de la mejor manera es imperativo implementar los planes de manejo ambiental establecidos por la ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993), que se desprenden de las necesidades derivadas e identificadas en los correspondientes estudios de impacto ambiental presentados para el otorgamiento de las licencias.

Entre los impactos ambientales más significativos de las centrales hidroeléctricas de embalse se encuentran la alteración de entornos naturales, la degradación del suelo, la destrucción de ecosistemas acuáticos y terrestres, el desplazamiento de especies y la pérdida de circuitos y de corredores biológicos. Fuera de lo enunciado,

las centrales hidroeléctricas como las de embalse demandan la inundación de grandes superficies, lo que implica cambios en el paisaje y aumenta la eutrofización y el consecuente crecimiento acelerado de algas debido a la quietud de sus aguas (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 498).

Los mencionados impactos pueden ser o no relevantes dependiendo en gran medida de su identificación en los estudios de impacto ambiental elaborados en las etapas de prefactibilidad y de factibilidad de los proyectos. Lo anterior debe asociarse con el uso adecuado de nuevas tecnologías en la construcción de los proyectos hidroeléctricos y con la implementación de los planes de manejo ambiental pertinentes, que conllevan la mitigación positiva de dichos impactos ambientales durante la ejecución de los proyectos.

Tabla 6. Principales ventajas y desventajas de las centrales hidroeléctricas de embalse

Ventajas	Inconvenientes
* Es energía limpia y renovable.	* Depende de precipitaciones.
* Se transforma de manera directa.	* Embalse limitado del agua.
* Gran capacidad de generación.	* Costo elevado de construcción.
* Vida de embalses es mucho mayor que centrales de carbón.	* Impacto ambiental importante.
* Controlan inundaciones y regulan el agua de riego.	

Fuente: Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014, p. 498)

INCIDENCIA DE FACTORES SOCIOPOLÍTICOS Y AMBIENTALES POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA PESTEL

Después de analizar los factores externos globales y locales que afectan o pueden afectar en sentido positivo o negativa los proyectos hidroeléctricos se presentan a continuación, de acuerdo con la metodología Pestel, que incluye los aspectos políticos, económicos, sociales, tecnológicos y legales y con las siguientes convenciones: círculo verde para importancia alta, amarillo para importancia media y rojo para importancia baja.

Importancia alta

Aspectos políticos:

- **Políticas públicas de desaceleración de construcción de proyectos hidroeléctricos:** los proyectos hidroeléctricos en el mundo están sujetos a la política de los países, lo que ha llevado a que en algunas naciones líderes en la generación de energía hidroeléctrica, como China, Estados Unidos, Canadá y Brasil, e, incluso, Colombia, se presente una desaceleración en la construcción de nuevos proyectos a causa de las preocupaciones por los impactos socioambientales y de la disminución de la disponibilidad de sitios económicamente atractivos para grandes proyectos (IEA, 2021).

- **Políticas públicas para la transición energética en Colombia:** en el país se dictó un marco normativo para la implementación de la transición energética que permita dinamizar el mercado energético a través de las leyes 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) y 2099 de 2021 (Congreso de Colombia, 2014). En

este sentido, se buscó diversificar la canasta energética no dependiente de la generación de energía eléctrica que utilice combustibles fósiles.

- **Colombia y los Objetivos de Desarrollo Sostenible:** el país, como miembro de las Naciones Unidas, forma parte de las naciones que buscan el desarrollo humano sostenible y aportan a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS), definidos en la Agenda Mundial de Desarrollo para el período 2015-2030.

- **Incidencia política en los órganos de la política energética del país:** poco después del inicio del nuevo gobierno en Colombia el 7 de agosto de 2022, el presidente de la República intentó asumir las funciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para tener el manejo de la regulación del régimen tarifario de los servicios públicos. La medida está suspendida por un fallo del Consejo del Estado. Esta situación generó incertidumbre en el manejo de la política energética, lo que, a su vez, desestimuló la inversión en los diferentes proyectos de generación de energía.

Aspectos sociales:

- **Oposición a los grandes proyectos hidroeléctricos y a su impacto en las comunidades locales:** en la actualidad, desde la concepción de la construcción de los grandes proyectos hidroeléctricos se presenta cada vez, y con mayor persistencia, la oposición a ellos por parte de comunidades locales e indígenas y de organizaciones no gubernamentales en algunos casos. Lo anterior se fundamenta en los impactos negativos en la disponibilidad de agua y otros de tipo medioambiental y en la reubicación de las comunidades locales, lo que implica tensiones entre ellas y las empresas y las demás organizaciones promotoras de los

proyectos hidroeléctricos, en especial los de gran tamaño.

Aspectos ambientales:

- **Afectación de la biodiversidad por la construcción de las obras asociadas con los proyectos hidroeléctricos:** cada vez con mayor intensidad en el mundo se plantean propuestas de desarrollo y de transición energética basadas en soluciones limpias o renovables no convencionales, entre las que no se contempla la generación de energía hidroeléctrica de gran tamaño. Lo anterior se fundamenta en que con la construcción de grandes proyectos hidroeléctricos se impacta en forma significativa el medio ambiente en sus componentes físicos y bióticos debido a la construcción de obras infraestructuras, como las presas, y a la desviación o la interrupción de los ríos, lo que conlleva la afectación de la vida silvestre, además de la inundación de tierras, que puede incidir en sentido negativo en el ecosistema local.

Aspectos legales:

- **Licenciamiento y permisos ambientales:** los proyectos hidroeléctricos están sujetos a regulaciones y a leyes y a otras normas nacionales e internacionales en relación con el medio ambiente, la salud y la seguridad energética y alimentaria. Además, los derechos de propiedad y el uso del agua pueden estar sujetos a conflictos legales. Lo anterior ha traído consigo dificultades debido a la complejización de los procedimientos para la obtención de permisos y del licenciamiento en materia ambiental y social, lo que conduce a largos períodos para su obtención, lo que se traduce en retrasos en la construcción de los proyectos y en mayores riesgos para la inversión y su respectivo retorno. Además de lo anterior,

se afectan la seguridad y la estabilidad energética de los países.

Importancia media:

Aspectos económicos:

- **Costo de construcción de los proyectos hidroeléctricos:** en los proyectos hidroeléctricos, según su magnitud, se incurre en altos costos para su construcción, lo que conlleva una gran inversión de capital. No obstante, la recuperación financiera después de su puesta en operación implica que su rentabilidad sea atractiva para los inversionistas. Para garantizar la ejecución de proyectos hidroeléctricos de gran tamaño en el mundo se deben garantizar medidas de política pública que incrementen a certeza sobre los ingresos futuros de los inversionistas por medio de la reducción de los riesgos de la inversión y del aseguramiento de la viabilidad económica de dichos proyectos.

- **Desarrollo económico de los países:** la construcción de grandes proyectos hidroeléctricos es una fuente significativa de ingresos para las economías locales y las regiones en las que se desarrollan debido a la considerable generación de empleo y a la dinamización de las economías locales. Asimismo, los proyectos en mención, debido a sus bajos costos de operación, se convierten en una fuente importante de ingresos y de desarrollo para los países, la industria y la población.

Aspectos tecnológicos:

- **Desarrollo tecnológico:** la tecnología ha evolucionado de manera considerable en el campo de los proyectos hidroeléctricos, lo que ha permitido aumentar la eficiencia y reducir los costos. De igual manera, la tecnología también puede ayudar a mitigar los efectos negativos en el medio ambiente mediante la implementación de prácticas sostenibles en la construcción y la operación de infraestructuras esenciales en los proyectos hidroeléctricos, como son las presas.

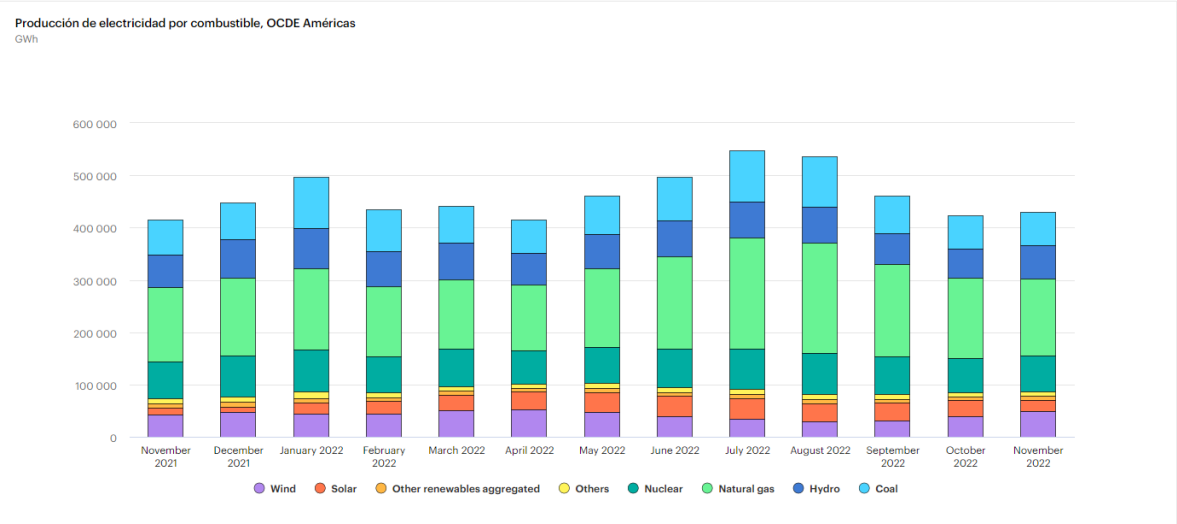
SITUACIÓN DE LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN LATINOAMÉRICA:

El uso de la energía primaria empleada para generar energía eléctrica en Latinoamérica deja de manifiesto que el 60% de ella proviene de combustibles fósiles para producir la energía secundaria. No obstante, hay la excepción en países como Brasil y Colombia, que emplean la energía hidráulica en más de un 60% como fuente de electricidad (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 75).

De acuerdo con Corredor (2018, p. 112), “se denomina energía primaria a la energía de las fuentes que se encuentran directamente en la naturaleza, como el petróleo, el carbón, el gas natural, la hidroenergía, el viento, el sol, los mares, la biomasa, etc.”. Según la misma fuente (p. 112), “la energía secundaria es aquella obtenida mediante procesos de transformación de la energía primaria, tales como la electricidad, los derivados del petróleo, el carbón de leña, entre otras”.

Tal se observa en la figura 18, en los países de América de la OCDE, de conformidad con la IEA (2023b), la producción neta total de electricidad fue de 430,3 TWh en noviembre de 2022, es decir, un 3,7% más que en el mismo mes del año anterior. Las fuentes renovables contribuyeron en gran medida a esta tendencia con un crecimiento interanual del 13,1%, mientras que la producción de electricidad a partir de combustibles fósiles se mantuvo prácticamente sin cambios (0,7% interanual) (IEA, 2023b).

Figura 16. Producción de electricidad por tipo de combustible en los países de América que forman parte de la OCDE en noviembre de 2022

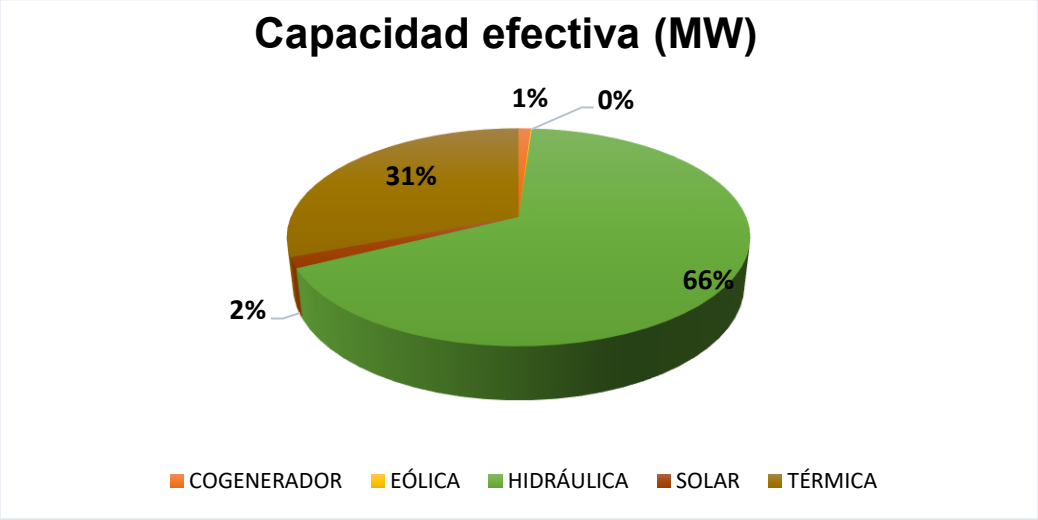


Fuente: IEA (2023c)

LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN COLOMBIA Y SU IMPACTO EN EL SIN:

Según XM (2023, 15 de marzo), operador del SIN, la capacidad instalada en la fecha mencionada fue de 18.871,41 MW.

Figura 17. Distribución de capacidad efectiva (MW) de energía eléctrica en Colombia el 15 de marzo de 2023



Fuente: elaboración propia con base en XM (2023, 15 de marzo)

El sistema eléctrico nacional está constituido por siete grandes operadores del sistema hidroeléctrico: Empresas Públicas de Medellín E. S. P. (EPM), Enel Colombia S. A. E. S. P., Isagen S. A. E. S. P., AES Colombia & Cía. S. C. A. E. S. P., Celsia Colombia S. A. E. S. P., Empresa Urrá S. A. E. S. P. e Hidroeléctrica del Alto Porce S. A. S. E. S. P., dieciocho operadores de 124 unidades térmicas que

operan con gas natural, carbón, fueloil y gasoil, combustóleo o mezclas de gas natural, carbón fueloil (ACPM o combustóleo). Además, también forman parte del SIN 120 pequeñas PCH o minicentrales, con potencias que oscilan entre 19,99 y 0,30 MW y operadas por 40 agentes; 23 unidades de generación solar con capacidades entre los 3 y los 19,90 MW operadas por 11 agentes y una planta de generación eólica de EPM ubicada en el departamento de La Guajira (Jepirachi), con capacidad instalada de 18,42 MW. Por tipos de entidad, en el SIN hay 103 de generación, 14 de transporte o transmisión, 36 de distribución y 141 de comercialización. La longitud de las líneas de transmisión, tanto de alta tensión (500 KV) como de tensiones menores, es de 29.346,72 km, magnitud que da cuenta de su extensión.

A partir de los datos mencionados se constata que Colombia cuenta con una base de generación de energía eléctrica limpia, cercana al 70% de su matriz energética, en la que la generación hidráulica es el 96%, por lo que, y según estadísticas de organizaciones energéticas de cobertura mundial, es el cuarto país en el mundo en capacidad de generación de energía hidráulica (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 508).

En conclusión, es sobresaliente y notorio el impacto de la generación de energía hidráulica a la matriz nacional, con una contribución de más del 65% de la capacidad instalada, lo que conlleva que es parte fundamental e indispensable para la sostenibilidad y la estabilidad del sistema.

Principales centrales de generación de energía hidroeléctrica en Colombia:

Como se describió en páginas anteriores, Colombia cuenta con una matriz limpia de generación de energía eléctrica fundamentada en su mayoría en fuentes limpias y renovables como lo es la generación hidroeléctrica. En este sentido, es importante resaltar cómo en el país durante más de 50 años, con fundamento en un modelo de

alianzas público-privadas, se construyó un sistema robusto de centrales de generación hidroeléctrica que han contribuido de manera eficiente y sostenida a la estabilidad y a la seguridad energética del país, lo que ha permitido el desarrollo y el crecimiento armónico de su economía y el mejoramiento de la calidad de vida de los pobladores.

A continuación se relacionan las principales centrales de generación hidroeléctrica en el país, su capacidad instalada y el agente operador correspondiente:

Tabla 7. Principales centrales hidroeléctricas colombianas por agente operador y por departamento de ubicación

Agente operador	Nombre de la central	Capacidad efectiva (MW)	Año de entrada en operación	Departamento de ubicación
EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E. S. P.	PORCE III	730	2011	Antioquia
	ITUANGO	580	2022	Antioquia
	GUATAPÉ	560	1972	Antioquia
	GUATRÓN	512	1966	Antioquia
	PORCE II	405	2001	Antioquia
	LA TASAJERA	306	1994	Antioquia
	PLAYAS	207	1988	Antioquia
	SAN FRANCISCO	135	1969	Caldas
	TRONERAS	40	1964	Antioquia
	ESMERALDA	30	1963	Caldas
ENEL COLOMBIA S. A. E. S. P.	GUAVIO	1.250	1993	Cundinamarca
	PAGUA	600	1986	Cundinamarca
	BETANIA	540	1987	Huila
	EL QUIMBO	400	2015	Huila

Agente operador	Nombre de la central	Capacidad efectiva (MW)	Año de entrada en operación	Departamento de ubicación
	DARÍO VALENCIA SAMPER	150	2013	Cundinamarca
	SALTO II	35	2014	Cundinamarca
ISAGEN S. A. E. S. P.	SAN CARLOS	1.240	1984	Antioquia
	SOGAMOSO	819	2014	Santander
	MIEL I	396	2002	Caldas
	JAGUAS	170	1988	Antioquia
	AMOYA LA ESPERANZA	80	2013	Tolima
	SAN MIGUEL	50	2015	Antioquia
AES COLOMBIA & CÍA. S. C. A. E. S. P.	CHIVOR	1.000	1977	Boyacá
CELSIA COLOMBIA S. A. E. S. P.	ALBÁN	427	2000	Valle del Cauca
	SALVAJINA	315	20/07/1995	Cauca
	CALIMA	132	1967	Valle del Cauca
	CUCUANA	58	2015	Tolima
	PRADO	51	1973	Tolima
EMPRESA URRÁ S. A. E. S. P.	URRÁ	338	2000	Córdoba
HIDROELÉCTRICA DEL ALTO PORCE S. A. S. E. S. P.	CARLOS LLERAS	78	2015	Antioquia
	ESCUELA DE MINAS	55	2019	Antioquia

Fuente: elaboración propia con base en XM (2023, 15 de marzo)

ENERGÍA DE PEQUEÑOS APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS (PCH):

Colombia ha desarrollado un alto potencial para la construcción y la puesta en operación comercial de minicentrales hidroeléctricas o PCH, de las que hasta la fecha, y según datos del operador XM (2023), hay en operación al menos 120 centrales del mencionado tipo, con potencias que oscilan entre 19,99 y 0,30 MW.

Las PCH en Colombia se consideran FNCER gracias a las leyes 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) y 2099 de 2021 (Congreso de Colombia, 2021), que establecieron todo el marco legal para promover la implementación y el uso de este tipo de energías. Lo anterior se fundamenta en que las PCH pueden presentar ventajas en los escenarios energéticos proyectados en la planeación energética del país para 2030 dado que son seguras y rentables y que requieren menor inyección de capital para su construcción. Además, los impactos en materia ambiental pueden ser menores por su magnitud frente a una central hidroeléctrica convencional, lo que las convierte en una opción viable para la generación de energía en el futuro en el país. Fuera de ello, forman parte de la tecnología energética prominente en diferentes departamentos del país, como Antioquia, que tiene un alto potencial hidroeléctrico no utilizado debido a sus abundantes aguas y caudales y con calidad apropiada del agua de las diferentes regiones que lo componen por las caídas topográficas, la regulación natural y las condiciones geológicas sólidas del subsuelo del departamento (Duque Grisales y Vásquez, 2016, p. 76).

Tabla 8. Número de PCH por departamento y capacidad instalada agregada

Departamento de ubicación	Número de PCH	Capacidad efectiva agregada (MW)	Participación porcentual en la de capacidad instalada
Antioquia	50	443,56	49,85
Cundinamarca	12	151,10	16,98
Valle del Cauca	9	82,34	9,25
Caldas	9	46,48	5,22
Cauca	11	37,67	4,23
Risaralda	3	28,40	3,19
Nariño	3	22,95	2,58
Santander	3	22,20	2,50
Boyacá	2	20,90	2,35
Tolima	8	17,88	2,01
Huila	3	7,12	0,80
Bogotá D. C.	2	4,40	0,49
Quindío	4	4,28	0,48
Putumayo	1	0,47	0,05
Total de la capacidad instalada	**120**	**889,75**	**100**

Fuente: elaboración propia con base en XM (2023, 3 de abril)

PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA DE GRAN TAMAÑO EN CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA:

Colombia tiene un elevado potencial para desarrollar proyectos hidroeléctricos debido a su caudal acumulado de agua, estimado en 52.075 m^3/s y distribuido en un área total de 1.141.748 km^2, lo que implica una energía potencial de 250 MW instalables para generación hidroeléctrica (Robles Algarin y Rodríguez Álvarez, 2018, p. 13).

Tabla 9. Proyectos hidroeléctricos convencionales (sin Hidroituango) vigentes por departamento y su capacidad instalada

Departamento	Municipio	Nombre	Capacidad (MW)	Fecha de entrada en operación
Cauca	El Tambo	Proyecto Hidroeléctrico Micay	800	20 de marzo de 2029
Tolima	Chaparral	Proyecto Hidroeléctrico Hidro Irco	200	1 de febrero de 2026
Caldas	Samaná	Proyecto Hidroeléctrico Samaná Medio	183	1 de enero de 2030
Antioquia	Urrao	Pequeña Central Hidroeléctrica Sabanas	90	1 de diciembre de 2028
Tolima	Chaparral	Proyecto Hidroeléctrico del Río Abeima	45	1 de noviembre de 2026
Antioquia	Andes	Central Hidroeléctrica El Limón	39	1 de diciembre de 2016

Fuente: elaboración propia con base en UPME (2023, p. 19)

Si bien es cierto que Colombia tiene un alto potencial para la generación de energía hidroeléctrica de mediana y gran capacidad, por encima de 20 MW, hoy en día solo hay tres grandes proyectos: Micay, Hidro Irco y Samaná Medio. En cuanto al proyecto Ituango, que en la fecha es la Central Ituango, a cargo de EPM, su capacidad instalada total será de 2.400 MW de potencia; están en operación e integradas al SIN desde diciembre de 2022 las primeras dos unidades de generación, con capacidad conjunta de 600 MW.

Características técnicas del proyecto hidroeléctrico Ituango:

- **Propietario:** Sociedad Hidroeléctrica Ituango S. A. E. S. P., copropiedad del Instituto para el Desarrollo de Antioquia (IDEA), con el 50,74%, del Municipio de Medellín a través de EPM, con el 46,33%, del Departamento de Antioquia, con el 2.1%, y de accionistas minoritarios, con el 0,83%.
- **Desarrollador:** EPM.
- **Capacidad instalada:** 2.400 MW.
- **Generación media anual prevista:** 13.930 GWh.
- **Número, tipo y capacidad instalada de unidades:** ocho turbinas de tipo Francis de 300 MW cada una.
- **Altura de la presa:** 237 metros.
- **Volumen de la presa:** 20 millones de m^3.
- **Caudal medio del río Cauca:** 1.010 m^3/s.
- **Área del embalse en situación de suministro completo o FSL[2]:** 35 km^2. El embalse tiene una longitud de 78 km y un volumen de 2.800 millones de m^3 de agua en su máximo nivel de operación.
- **Intensidad de emisiones de CO_2:** 4,39 gCO_2/kWh.

[2] FSL: forma abreviada que proviene de las iniciales de la expresión en inglés "*full supply level*".

- **Ubicación del proyecto:** noroccidente del departamento de Antioquia, a cerca de 170 kilómetros de la ciudad de Medellín.

Fotografía aérea del proyecto Hidroituango

Fuente: EPM (2023)

Hidroituango es el mayor proyecto de generación hidroeléctrica ejecutado por EPM a lo largo de toda su historia empresarial. La construcción del proyecto Ituango no solo ha sido un gran reto de ingeniería para la entidad, sino para el país, debido a que han enfrentado diversas dificultades y obstáculos ambientales y sociales y a contingencias como la ocurrida el 28 de abril de 2018, causada por el taponamiento que se presentó en el túnel de la galería auxiliar de desviación (GAD) del río Cauca, que obligó a declarar la alerta roja, tanto en la zona en la que se ejecutaba el proyecto como también en los municipios situados aguas abajo. Esta situación

también forzó a pasar las aguas del río Cauca por la casa de máquinas en mayo de 2018, lo que implicó el retraso de la entrada en operación de las ocho turbinas de la central, programada para 2021 (EPM, 2023).

La empresa trabajó en los últimos años para superar la contingencia y su primera prioridad fue salvaguardar la seguridad y la vida de las personas residentes en las poblaciones aguas abajo y de los trabajadores de la obra. En segundo lugar, la organización priorizó la protección de los ecosistemas y de las comunidades y, por último, la estabilización y la recuperación del proyecto desde el punto de vista técnico, con la intención de posibilitar la operación la totalidad de las ocho unidades previstas, lo que comenzó en diciembre de 2022 con la operación comercial de las primeras dos unidades (EPM, 2023).

Beneficios del proyecto hidroeléctrico Ituango para Colombia:

Según EPM (2023), “el Proyecto Ituango es una obra de infraestructura clave para el desarrollo del país”. La entrada en operación comercial del total de las unidades de generación proyectadas permitirá generar alrededor del 17% de la demanda de energía requerida por el país, equivalente al consumo de 6,5 millones de hogares, de manera limpia, renovable, confiable, de bajo costo y segura.

En materia de sostenibilidad:

El proyecto Hidroituango, hoy central Ituango, por su magnitud tiene un significativo impacto ambiental, social y económico, no solo en la región en la que se construye, sino también en el departamento y en el país, lo cual lo convierte relevante en alto grado en materia de desarrollo sostenible. Este tipo de proyectos, si bien tiene impactos negativos que deben de ser mitigados y manejados los inversionistas dueños del proyecto, los contratistas y los constructores, también ha traído consigo

un sinnúmero aspectos positivos, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, las transferencias de recursos a los entes territoriales pertinentes y a la Nación y los esfuerzos de compensación y de recuperación ambiental, así como las inversiones en infraestructura social y comunitaria en los municipios del área de influencia directa e indirecta (EPM, 2023).

Una de las mencionadas contribuciones del proyecto hidroeléctrico Ituango es la reducción de emisiones de CO_2, estimada en 4,4 millones anuales de toneladas, que equivale al 94% de la meta del sector eléctrico colombiano para 2030. Lo anterior traerá consigo un impacto positivo en el cumplimiento de los compromisos de Colombia en el marco del Acuerdo de París (COP21) para mitigar el cambio climático. La energía hidroeléctrica es una fuente de energía renovable y de bajo impacto ambiental, lo que la convierte en una alternativa importante para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir la huella de carbono del país (EPM, 2023).

Además, la central Ituango genera y generará importantes recursos económicos para los entes territoriales pertinentes y a la Nación a partir de las transferencias del sector eléctrico y también vía impuestos. Es así como a través de las transferencias determinadas por la ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993), se destinarán cerca de $85.000 millones anuales a las corporaciones autónomas y a los más de 150 municipios de la zona de influencia de la cuenca del río Cauca, lo que contribuye a fortalecer la financiación de programas y de proyectos de conservación ambiental y de desarrollo sostenible en la región. Además, por medio de impuestos regionales y de otras contribuciones, se generarán más de $10.000 millones anuales, que es una importante derrama económica en la zona (EPM, 2023).

En términos ambientales, el proyecto Hidroeléctrico Ituango también emprendió y sigue emprendiendo acciones de compensación y de recuperación de bosques en el área de influencia. Se estima que alrededor de 19.000 hectáreas de bosque seco y de bosque húmedo tropical se beneficiarán de dichas acciones en los 12

municipios involucrados en el proyecto de manera directa, lo que implica una oportunidad para la conservación de la biodiversidad y para la restauración de ecosistemas degradados y contribuye a la protección del medio ambiente y al fortalecimiento de la resiliencia de la región frente a los efectos del cambio climático (EPM, 2023).

Otro aspecto relevante de proyectos hidroeléctricos de gran envergadura, como Hidroituango, es su alta inversión en infraestructura social y comunitaria en la región. A través del Plan de Manejo Ambiental y Social del proyecto, según EPM (2023), se han destinado más de $1,9 billones a iniciativas de conectividad en los 12 municipios de la zona de influencia directa. Lo anterior significa una contribución significativa al mejoramiento y a la transformación del territorio, que a lo largo de la historia ha enfrentado un prolongado abandono del Estado y la violencia de grupos armados no legales. Las inversiones en infraestructura social y comunitaria han aportado en forma considerable a mejorar la calidad de vida de las comunidades locales, a promover la equidad y el desarrollo sostenible y a fortalecer la gobernabilidad y la presencia institucional en la región (EPM, 2023).

Además, en cumplimiento del Plan de Manejo Ambiental y Social, y como medidas de mitigación de los impactos sobre la población que estaba asentada en el área de influencia directa, EPM ejecutó una serie de programas que han restablecido las condiciones de vida y los medios de subsistencia de las comunidades afectadas. Fuera de ello, y con enfoque étnico, el proyecto apoyó a la comunidad Nutabe de Orobajo para obtener el reconocimiento oficial como comunidad indígena en Colombia y obtener derechos sobre la tierra comunal (EPM, 2023).

De igual manera, en materia social, EPM desarrolló un programa de prospección y de excavación arqueológica previa a la construcción, un plan de hallazgos casuales y campañas de capacitación y de concientización asociadas que se implementaron durante la construcción y que llevaron a la recuperación de muchos artefactos transferidos al Museo Universitario de la Universidad de Antioquia. El plan de

gestión del patrimonio arqueológico y cultural incluye medidas de compensación por la pérdida de infraestructura social y comunitaria (EPM, 2023).

En materia de competitividad:

Según EPM (2023), “la oferta energética del Proyecto Ituango permitirá una reducción cercana al 30% en el precio de bolsa durante sus primeros 5 años de operación, lo cual se espera traiga consigo menores tarifas de energía para los usuarios”. La generación de la central Ituango permitirá disminuir el costo de la energía hasta en más del 20% en zonas como la costa Caribe debido a la reducción del costo que se paga por la generación térmica de dicha región. Además, asegurará mayor firmeza al sistema, así como el mejoramiento de la prestación de los servicios públicos en el país (EPM, 2023).

En materia de confiabilidad: energía firme que reduce emisiones de CO_2:

De acuerdo con EPM (2023),

> El proyecto proyecta una energía firme de 5,708 GWh – año (energía que se puede producir en épocas de peor sequía). No contar con la Central Ituango implicaría instalar una planta térmica de 750 MW, con la consecuente huella de carbono que esto implicaría para para las metas asumidas por Colombia en el COP21.
>
> Producir la energía firme de Ituango con fuentes renovables no convencionales equivale a instalar cerca de 50 MW eólicos o 3.800 MW solares”.

ANÁLISIS DE COSTO RESPECTO DE LA EFICIENCIA DE LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA CONVENCIONAL FRENTE A OTRAS FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA:

Mercado de generación de energía eléctrica:

El sistema de venta y compra de energía eléctrica en Colombia opera del siguiente modo: las empresas comercializadoras y los grandes consumidores adquieren la energía en un mercado de grandes bloques de energía, que opera libremente, según las condiciones de oferta y demanda, y que deben estar integrados al SIN para participar en el mercado; de esta manera se promueve la competencia entre generadores. Por su cuenta, los comercializadores y los grandes consumidores actúan mediante la celebración de contratos de energía eléctrica con los generadores, de común acuerdo entre las partes contratantes y sin la intervención del Estado. La operación y la administración del mercado están a cargo de la Compañía de Expertos en Mercados (XM), empresa que opera y administra el mercado eléctrico colombiano, que tiene bajo su responsabilidad, entre otras funciones, el Centro Nacional de Despacho (CND), cuya finalidad es programar la utilización diaria de los recursos del SIN en materia de generación para atender la demanda de energía con criterios de confiabilidad, seguridad, economía y calidad (Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 98).

El análisis de costos y los beneficios es una herramienta fundamental en la evaluación de proyectos de generación de energía eléctrica. En este sentido, es importante tener en cuenta que este tipo de proyectos son de largo plazo y que los costos y los beneficios pueden variar de manera significativa de acuerdo con la tecnología utilizada y las características locales de los recursos disponibles. Una de las formas de comparar los costos de diferentes tecnologías de producción de

energía es a través del cálculo del costo nivelado de energía o LCOE[3], que es un indicador que permite estimar los costos unitarios de generación de energía a lo largo de la vida útil del proyecto y que se calcula dividiendo el total de gastos durante la vida útil del proyecto por la cantidad de electricidad neta que se espera generar, que es el valor presente del costo de generación de energía por unidad de electricidad producida (kWh) (García *et al.*, 2013, pp. 29-30).

Es importante tener en cuenta tanto los costos privados como los sociales en el análisis de costos y beneficios. Los primeros incluyen los gastos directos de inversión, operación y mantenimiento del proyecto, así como los ingresos generados por la venta de energía. Los segundos, por otro lado, consideran los impactos externos del proyecto en la sociedad y el medio ambiente, como, por ejemplo, los efectos en la salud, el medio ambiente, el empleo y la calidad de vida de las comunidades locales. El análisis de beneficios también debe considerar tanto los privados como los sociales. Los primeros incluyen los ingresos generados por la venta de energía, mientras que en los segundos se deben tener en cuenta la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la mejora en la calidad del aire, la creación de empleo local y el desarrollo económico de la región, entre otros aspectos (García *et al.*, 2013, p. 29).

Se deben analizar de manera exhaustiva y rigurosa los costos y los beneficios de los proyectos de generación de energía eléctrica y para ello es indispensable considerar todas las implicaciones económicas, sociales y ambientales a lo largo de la vida útil del proyecto. Esto permite tomar decisiones informadas y maximizar los beneficios para la sociedad en general.

De acuerdo con García *et al.* (2013), con base en lo expresado por el Irena (2013), “el LCOE de las tecnologías de generación de energía a partir de fuentes renovables

[3] LCOE: forma abreviada que proviene de las iniciales de la expresión en inglés “*levelized cost of energy*”.

está determinado por seis componentes claves, sin tener en cuenta las externalidades tanto positivas como negativas que cada tecnología genera" (p. 30):

1. Calidad de los recursos
2. Costos y desempeño de equipos
3. Combustibles (en caso de ser utilizados)
4. Costos de operación y de mantenimiento
5. Vida económica del proyecto
6. Costo del capital o inversión del proyecto

Al tomar en cuenta dichos factores del LCOE, se presentan a continuación los costos totales de instalación por tipos de tecnologías renovables (bioenergía, geotérmica, hidroeléctrica, solar fotovoltaica y eólica), así como su factor de capacidad y su LCOE en USD para el año 2020 en el mundo:

Tabla 10. Costo total mundial instalado, factor de capacidad y LCOE por tipo de tecnología renovable en 2020

Fuente de energía renovable	Costo total instalado en 2020 (USD/kW)	Factor de capacidad (porcentaje)	LCOE en 2020 (USD/kWh)
Bioenergía	2.543	70	0,076
Geotérmica	4.468	83	0,071
Hidroeléctrica	1.870	46	0,044
Solar fotovoltaica	883	16	0,057
Eólica	1.355	36	0,039

Fuente: elaboración propia con base en Irena (2023)

En el caso de Colombia no fue posible obtener la información relacionada de manera discriminada por tipo de tecnología del LCOE y de su factor de capacidad.

Al tomar en consideración los datos mundiales, es importante tener en cuenta, a la hora de valorar los costos, tanto de implementación como de generación de las diferentes fuentes de energía, evaluar las externalidades sociales y ambientales que afectan a la población y que, si no se interiorizan en los proyectos, al final se trasladan a la sociedad en general, dependiendo del tipo de externalidad (García *et al.*, 2013, pp. 31-32).

De igual manera, y al analizar en conjunto los factores presentados, es fundamental estudiar en detalle la firmeza y la confiabilidad que le dan al sistema ciertas tecnologías. Este es el caso de las centrales hidroeléctricas, que generan mayor estabilidad y seguridad al sistema, además de menores costos de generación, que se trasladan en la mayoría de los casos al usuario final.

Si bien es cierto que los costos de inversión de capital de las centrales hidroeléctricas de embalse son altos, la capacidad de producción de la planta y su período de vida útil, así como sus bajos costos de operación y de mantenimiento, al compararlos con los costos nivelados sin tener en cuenta las externalidades negativas no contempladas en la inversión de los proyectos, se encuentra que dichas centrales son las de menores costos (García *et al.*, 2013, p. 61).

CONCLUSIONES

El diagnóstico de las matrices energéticas actual y futura de Colombia es esencial para entender el panorama energético del país y evaluar la viabilidad de los proyectos hidroeléctricos convencionales. La mencionada evaluación debe tener en cuenta tanto la demanda de energía como las posibles limitaciones y oportunidades para la generación de energía hidroeléctrica. En este entendido, y según lo encontrado en el presente trabajo, Colombia cuenta con el potencial para desarrollar grandes proyectos de generación de energía hidroeléctrica y los necesita.

La generación hidroeléctrica convencional es una fuente de energía renovable y limpia que puede contribuir de manera significativa a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y a la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero. Además, es una fuente de energía flexible y le da al sistema la estabilidad requerida.

En términos de efectividad respecto del costo, la generación hidroeléctrica convencional es una de las opciones más rentables para la generación de energía eléctrica en Colombia. Sin embargo, los aspectos sociopolíticos y de licenciamiento ambiental, así como otras externalidades que hoy en día se presentan, han generado incertidumbre a la hora de desarrollar dicho tipo de proyectos.

La ejecución de nuevos proyectos de generación hidroeléctrica convencional enfrenta grandes desafíos políticos, ambientales y sociales, como la oposición de las comunidades locales, la protección de la biodiversidad y la gestión de los recursos hídricos. Por lo tanto, es importante llevar a cabo un análisis detallado de los mencionados factores y tomar medidas para mitigar los posibles impactos negativos de los proyectos hidroeléctricos convencionales. Por lo anterior, es fundamental que el Gobierno nacional propicie las condiciones favorables que permitan un marco de actuación institucional que posibilite el desarrollo de grandes proyectos hidroeléctricos.

REFERENCIAS

Castiblanco-Urrego, O., y Milquez-Sanabria, H. (2021). Estudio y simulación de un gasificador con captura de CO_2 para la producción de hidrógeno azul partiendo de carbón colombiano. *Revista UIS Ingenierías*, *20*(4), 91-100. https://doi.org/DOI 10.18273/revuin.v20n4-2021007

Comisión Mundial de Represas (2000, noviembre). *Represas y desarrollo. Un nuevo marco para la toma de decisiones. El reporte final de la Comisión Mundial de Represas*. Earthscan Publications. https://www.yumpu.com/es/document/view/14524428/represas-y-desarrollo-un-nuevo-marco-para-la-toma-decisiones

Compañía de Expertos en Mercados (XM) (2023). *Paratec. Parámetros técnicos de elementos del sector eléctrico colombiano* del 15 de marzo de 2023 al 3 de abril de 2023. XM. http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/default.aspx

Congreso de Colombia (1993, 22 de diciembre). *Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones*. Congreso de Colombia. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf

Congreso de Colombia (1994a, 11 de julio). *Ley 142 de 1994, por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*. Congreso de Colombia. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752

Congreso de Colombia (1994b, 11 de julio). *Ley 143 de 1994, por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se*

conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética. Congreso de Colombia. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4631

Congreso de Colombia (2014, 13 de mayo). *Ley 1715 de 2014, por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*. Congreso de Colombia. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353

Congreso de Colombia (2021, 10 de julio). *Ley 2099 de 2021, por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones*. Congreso de Colombia. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326

Consejo Privado de Competitividad (CPC) (2021). *Informe Nacional de Competitividad 2021-2022*. CPC. https://www.compite.com.co/informe/informe-nacional-de-competitividad-2021-2022/

Consejo Privado de Competitividad (CPC) (2022). *Informe Nacional de Competitividad 2022-2023*. CPC. https://www.compite.com.co/informe/informe-nacional-de-competitividad-2022-2023/

Corredor, G. (2018). Colombia y la transición energética. *Ciencia Política*, *13*(25), 107-125. https://doi.org/https://doi.org/10.15446/cp.v12n25.70257

Duque Grisales, E. A., y Vásquez, A. L. (2016). Alternativa de las pequeñas centrales hidroeléctricas de Antioquia en el mecanismo de desarrollo limpio. *Revista Ciencias Estratégicas*, *24*(35), 73-100. https://doi.org/rces.v24n35.a5

Empresas Públicas de Medellín (EPM) (2022). *Informe de gestión Grupo EPM 2021*. EPM. https://cu.epm.com.co/institucional/sostenibilidad

Empresas Públicas de Medellín (EPM) (2023, 5 de mayo). *Proyecto Hidroituango-Nuestra historia*. EPM. https://cu.epm.com.co/institucional/proyectos/hidroituango/proyecto-hidroituango

Enríquez Harper, G., y Enríquez Ruiz, P. (2018). *El ABC de las energías renovables en los sistemas eléctricos* (vol. 2). Limusa. https://doi.org/978-607-05-0829-5

Enríquez Harper, G., & Enríquez Ruiz, P. (2017). *Las energías renovables y la electricidad para todos*. Limusa. https://doi.org/978-607-05-0454-9

European Environment Agency (EEA) (2017). *La energía en Europa: situación actual*. EEA. https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2017-configuracion-del-futuro/articulos/la-energia-en-europa-situacion-actual

García, H., Corredor, A., Calderón, L., y Gómez, M. (2013, octubre). *Análisis costo beneficio de energías renovables no tradicionales en Colombia. Documento preparado para WWF*. Fedesarrollo. http://hdl.handle.net/11445/331

Grupo Sura (2016). El Niño y La Niña: origen, efectos y oportunidades. *Revista Geociencias Sura*, *1*(1), 1-45. https://www.gruposura.com/wp-content/uploads/2019/02/grupo-sura-revista-geociencias-edicion-1.pdf

Haraldsson, I. G. (2013). Geothermal activity in South America: Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, and Perú. En *Short Course on Conceptual Modelling of Geothermal Systems*, UNU-GTP and LaGeo, Santa Tecla, El Salvador, 24 de febrero a 2 de marzo. https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-16-04.pdf

Iberdrola (2023). *Qué es la energía hidroeléctrica ¿Sabes cómo funcionan las centrales hidroeléctricas?* Iberdrola. https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-hidroelectrica

i-deals, Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) y Montoya & Asociados, Ministerio de Minas y Energía, Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y UK Government (2021). *Hoja de ruta para la adopción del Hidrogeno en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía, Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Montoya & Asociados, ITT e i-deals. https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf

International Energy Agency (IEA) (2021a, junio). *Hydropower special market report. Analysis and forecast to 2030*. IEA. https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report

International Energy Agency (IEA) (2021b, 30 de junio). *Hydropower data explorer*. IEA. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/hydropower-data-explorer

International Energy Agency (IEA) (2022a, 26 de octubre). *Global net hydropower capacity additions by leading countries*, 2021-2030. IEA. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-net-hydropower-capacity-additions-by-leading-countries-2021-2030

International Energy Agency (IEA) (2022b, 26 de octubre). *Low-carbon electricity generation by technology, 2020*. IEA. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/low-carbon-electricity-generation-by-technology-2020

International Energy Agency (IEA) (2023a). *Global net hydropower capacity additions by region, 1991-2030*. IEA. https://www.iea.org/search?q=global-net-hydropower-capacity-additions-by-region-1991%20-2030

International Energy Agency (IEA) (2023b). *Hydropower*. IEA. https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydropower

International Energy Agency (IEA) (2023c, 16 de mayo). *Monthly electricity statistics*. IEA. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/monthly-electricity-statistics

International Renewable Energy Agency (Irena) (2021, junio). *Renewable power generation costs in 2020*. Irena. https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020

Lovelock, J. (2006). *La venganza de la Tierra*. *La teoría de Gaia y el futuro de la humanidad*. Planeta. https://doi.org/978-958-42-2021-9

Lovelock, J. (2011). *La Tierra se agota*. *El último aviso para salvar nuestro planeta*. Planeta. https://doi.org/978-958-42-2692-1

Malinow, G. V. (2011, agosto). El país debe revitalizar los emprendimientos hidroeléctricos. *Presas & Desarrollo*, *2*(4), 20. https://doi.org/https://cadp.org.ar/wp-content/uploads/2014/02/RevistaCAPNro4.pdf

Martínez-Hernández, J., Parra-Reyes, N., Guerrero-Martin, L. E., Camacho-Galindo, L. S., Salinas Silva, R., Guerrero, W. A., y Guerrero-Martin, C. A. (2021). Análisis DOFA para la evaluación del potencial de energía eólica en Colombia. *Fuentes, El Reventón Energético*, *20*(1), 45-55. https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022005

Mateus Valencia, A. C. (2016). Crisis energética en Colombia. *Tecnología, Investigación y Academia*, *4*(2), 74-81. https://doi.org/2344-8288

Muñoz-Fernández, J. H., Beleño-Mendoza, W. A., y Díaz-Consuegra, H. (2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. *Revista Fuentes, el Reventón Energético*, *20*(1), 57-72. https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022006

Oxilia, V., Ortigoza, E., Ríos, R., Fariña, R., & & Blanco, G. (2017). Harnessing natural resources with shared sovereignty for power generation in the Parana River Basin: systematization of lessons learned. En *Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies* (Chilecon). https://doi.org/10.1109/CHILECON.2017.8229549

Quintero González, J. R., y Quintero González, L. E. (2015). Energía mareomotriz: potencial energético y medio ambiente. *Gestión y Ambiente*, *18*(2), 121-134. https://doi.org/0124-177X

Robles Algarin, C., y Rodríguez Álvarez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el mundo, Latinoamérica y Colombia. *Revista Espacios*, *39*(34), 10-26. https://doi.org/0798 1015

Tarlock, D. (2012). Hydro Law and the future of hydroelectric power generation in the United States. *Revista de Leyes de Vanderbilt*, *65*(6), 1723-1768. https://heinonline.org/HOL/P?h=hein.journals/vanlr65&i=1951

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2015a). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. UPME. http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2015b, febrero). *Plan Energético Nacional-Colombia: Ideario energético 2050*. UPME. https://www1.upme.gov.co/paginas/plan-energetico-nacional-ideario-2050.asp

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2019a, mayo). *Mapa energético de Colombia 2019-2050*. UPME. https://www1.upme.gov.co/Hemeroteca/Memorias/Mapa_energetico_Colombia.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2019b, diciembre). *Plan energético nacional 2020-2050*. *Documento de consulta*. UPME. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2020, 10 de enero). *Estudio técnico para el plan de abastecimiento de gas natural*. *Documento de consulta*. UPME. https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/Plan_de_gas_documento_de_consulta.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2023, 31 de enero). *Informe de registro de proyectos de generación*. UPME. https://www1.upme.gov.co/siel/Inscripcion_proyectos_generacion/Registro_Enero_2023.pdf

Vega de Kuyper, J. C., y Ramírez Morales, S. (2014). *Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones.* Alfaomega. https://doi.org/ISBN: 978-607-707-820-3

Whittington, H., & Gundry, S. (1996). Global climate change and hydroelectric power. En *International Conference on Opportunities and Advances in International Power Generation*, Durham, Reino Unido. https://doi.org/https://doi.org/10.1049/cp:19960115