

Universidad
Externado
de Colombia

FACULTAD DE ADMINISTRACIÓN
DE EMPRESAS



**ESTUDIO PROSPECTIVO ESTRATÉGICO SOBRE LA TRANSICIÓN
ENERGÉTICA EN COLOMBIA AL 2040**

Estudio prospectivo estratégico como requisito para optar al título de
“Magíster en Pensamiento Estratégico y Prospectiva”

Autores

MARÍA DE LOS ÁNGELES PINTO CALDERÓN

YULIE ANDREA PAREJA MOLINA

Con el apoyo de

Luis Ferney Moreno

Ana Paola Gutiérrez

Departamento de Derecho Minero Energético

Tutor

FRANCISCO JOSÉ MOJICA SASTOQUE

UNIVERSIDAD EXTERNADO DE COLOMBIA
MAESTRÍA EN PENSAMIENTO ESTRATÉGICO Y PROSPECTIVA
FACULTAD ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS
CENTRO DE PENSAMIENTO ESTRATÉGICO Y PROSPECTIVA
BOGOTÁ, 2024

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	13
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	13
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	14
2.1 LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA	14
2.2 PANORAMA ENERGÉTICO GLOBAL Y NACIONAL	18
2.2.1 <i>Contexto</i>	18
2.2.2 <i>Situación actual en Colombia</i>	20
2.3 ESTADO Y PERSPECTIVAS POR TIPO DE ENERGÍA EN COLOMBIA	24
2.3.1 <i>Fuentes No Renovables: Hidrocarburos</i>	25
2.3.2 <i>Fuentes Renovables Convencionales</i>	27
2.3.3 <i>Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER)</i>	31
2.4 SISTEMA REGULATORIO Y HOJAS DE RUTA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN COLOMBIA	62
2.4.1 <i>Normatividad</i>	62
2.4.2 <i>Compromisos y metas de Colombia</i>	64
2.5 ANÁLISIS DE MEGATENDENCIAS, TENDENCIAS Y SEÑALES DÉBILES	70
2.5.1 <i>Megatendencias</i>	70
2.5.2 <i>Tendencias y señales débiles</i>	73
2.6 PUNTOS CRÍTICOS IDENTIFICADOS	77
2.6.1 <i>Factores impulsores</i>	77
2.6.2 <i>Factores retardadores</i>	78
CAPÍTULO 3. VIGILANCIA TECNOLÓGICA	79
3.1 INFORME FUTURE TODAY 2024: ENERGÍA.....	80
3.1.1 <i>Energía solar</i>	80
3.1.2 <i>Energía eólica</i>	82
3.1.3 <i>Otras energías renovables</i>	84
3.1.4 <i>Combustibles limpios</i>	86
3.1.5 <i>Energía nuclear</i>	87
3.1.6 <i>Formas emergentes de generación de energía</i>	88
3.2 CIENCIOMETRÍA.....	90

3.2.1 Metodología	91
3.2.2 Resultados de búsquedas en bases de datos	91
3.2.3 Análisis de clústeres	94
3.3 PATENTOMETRÍA	96
3.4 PRIORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS MEDIANTE IGO	113
CAPÍTULO 4. INTELIGENCIA COMPETITIVA	116
4.1 CONTEXTO GLOBAL.....	116
4.2 COMPETIDORES Y POSICIONAMIENTO EN EL MERCADO.....	117
4.2.1 Capacidad	117
4.2.2 Generación.....	118
4.2.3 Consumo.....	120
4.2.4 Compañías.....	120
4.2.5 Tecnología.....	121
4.2.6 Inversión.....	122
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS PROSPECTIVO ESTRATÉGICO	123
5.1 FACTORES DE CAMBIO.....	123
5.2 VARIABLES ESTRATÉGICAS.....	136
5.2.1 Sintaxis lógica	137
CAPÍTULO 6. JUEGO DE ACTORES.....	139
6.1 DEFINICIÓN DE ACTORES	139
6.2 RETOS Y OBJETIVOS	141
6.3 ESTIMACIÓN DE PODERES DE ACTORES	144
6.4 RELACIÓN ENTRE LOS ACTORES Y LOS OBJETIVOS.....	146
6.5 ESTRATEGIAS DE LOS ACTORES PARA DEFENDER SUS INTERESES	147
6.5.1 Campo de batalla “Capoteando las balas”	147
6.5.2 Campo de batalla “No hay enemigo pequeño”	147
6.5.3 Campo de batalla “No hay enemigo pequeño Round 2”	148
CAPÍTULO 7. ESCENARIOS DE FUTURO.....	149
7.1 ANÁLISIS MORFOLÓGICO	150
7.1.1 Construcción del espacio morfológico.....	150
7.1.2 Reducción del espacio morfológico	156
7.1.3 Escenarios posibles.....	159
7.2 ANÁLISIS MULTICRITERIO.....	162
7.2.1 Elección del escenario apuesta.....	167
7.3 ANÁLISIS DE PROBABILIDADES MEDIANTE SISTEMA DE MATRICES DE IMPACTO CRUZADO (SMIC)	169

7.3.1	<i>Formulación y evaluación de las hipótesis probabilísticas</i>	169
7.3.2	<i>Probabilidades corregidas y núcleo tendencial</i>	176
7.3.4	<i>Plan vigía</i>	178
CAPÍTULO 8. ESTRATEGIAS		181
8.1	PROGRAMAS	182
8.1.1	<i>Programa nacional de consenso y cooperación energética</i>	182
8.1.2	<i>Programa Nacional de Sostenibilidad Empresarial Certificada</i>	183
8.1.3	<i>Programa Nacional de Innovación Tecnológica y Transición Energética</i>	184
8.1.4	<i>Programa Nacional de Interoperabilidad Energética y Exportación Renovable</i>	184
8.1.5	<i>Programa Nacional de Economía Circular para la Sostenibilidad Energética</i>	185
8.1.6	<i>Programa Nacional para la Resiliencia Climática y la Transición hacia Cero Emisiones</i>	186
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		188
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		192

Listado de Figuras

Figura 1. Matriz energética mundial 2023	19
Figura 2. Costos de Capital de Tecnologías Energéticas Actual – Proyecciones (políticas establecidas) .	19
Figura 3. Proyección matriz energética global (políticas establecidas).....	20
Figura 4. Capacidad renovable instalada en Colombia por región	21
Figura 5. Matriz energética de Colombia 2022	22
Figura 6. Clasificación de fuentes de energía	24
Figura 7. Capacidad instalada de energía eléctrica y otras fuentes de energía renovable en MW (2021)..	28
Figura 8. Generación de energía eléctrica en Colombia (2023)	29
Figura 9. Generación de energía hidroeléctrica en América Latina y el Caribe	30
Figura 10. Generación de energía hidroeléctrica en América Latina y el Caribe.....	36
Figura 11. Capacidad de energía nuclear en tres países de América Latina	46
Figura 12. Países líderes de la generación de energía nuclear proyección para 2035	46
Figura 13. Emisiones de CO2 en algunos países	58
Figura 14. Capacidad de las instalaciones operativas de captura y almacenamiento de carbono a partir de 2022, por país (en millones de toneladas métricas por año).....	59
Figura 15. Instalaciones operativas de Captura y Almacenamiento de Carbono para 2023.....	61
Figura 16. Meta de mitigación en NDC actualizada 2020.....	65
Figura 17. Catalizadores transformación PND	68
Figura 18. Megatendencias	70
Figura 19. Tendencias relacionadas con transición energética	73
Figura 20. Tendencia publicaciones ecuación de búsqueda No. 1	92
Figura 21. Principales centros de investigación ecuación de búsqueda No. 1.....	92
Figura 22. Tendencia publicaciones ecuación de búsqueda No. 2	93
Figura 23. Principales centros de investigación ecuación de búsqueda No. 2.....	93
Figura 24. Tendencia publicaciones ecuación de búsqueda No. 3	94
Figura 25. Principales centros de investigación ecuación de búsqueda No. 3.....	94
Figura 26. Mapa de coocurrencia para la ecuación de búsqueda No. 1	95
Figura 27. Mapa de coocurrencia para la ecuación de búsqueda No. 2	95
Figura 28. Mapa de coocurrencia para la ecuación de búsqueda No. 3	96
Figura 29. Tendencia de patentes sobre “concentrated solar”	97
Figura 30. Tendencia de patentes sobre “multitasking solar”	98
Figura 31. Tendencia de patentes sobre “dispatchable solar”	100
Figura 32. Tendencia de patentes sobre “solar thermophotovoltaics”.....	101
Figura 33. Tendencia de patentes sobre “offshore floating wind turbines”	103
Figura 34. Tendencia de patentes sobre “vertical wind turbines”	104

Figura 35. Tendencia de patentes sobre “going bladeless”	106
Figura 36. Tendencia de patentes sobre “airborne wind energy”	108
Figura 37. Tendencia de patentes sobre “Ocean Thermal Energy Conversion”	109
Figura 38. Tendencia de patentes sobre “small scale hydro”	111
Figura 39. Matriz IGO referencia	113
Figura 40. Tecnologías priorizadas mediante matriz IGO	114
Figura 41. Aumento de la generación mundial de energía limpia por fuente y escenarios	116
Figura 42. Capacidad energía renovable acumulada mundial instalada 2023, por tecnología	117
Figura 43. Capacidad mundial acumulada de energías renovables instalada en 2023, por regiones	118
Figura 44. Capacidad de energías renovables instalada en 2023, por países	118
Figura 45. Generación mundial de electricidad a partir de energía renovable 2023, por fuente	119
Figura 46. Generación mundial de electricidad a partir de energía renovable 2022, por región	119
Figura 47. Participación energía renovable 2023 en generación, por región.....	119
Figura 48. Consumo energía renovable 2023, por región.....	120
Figura 49. Consumo energía renovable 2023, por país	120
Figura 50. Principales empresas de energías renovables del mundo en 2024, por ingresos.....	121
Figura 51. Capacidad de producción de los principales fabricantes de aerogeneradores	121
Figura 52. Participación en mercado de los fabricantes de módulos fotovoltaicos	122
Figura 53. Inversiones en financiación de activos de energías renovables, por países.....	122
Figura 54. Modelo prospectivo estratégico.....	123
Figura 55. Factores de cambio clasificados en matriz PESTEL	129
Figura 56. Priorización de factores de cambio mediante matriz IGO.....	136
Figura 57. Sintaxis Lógica	138
Figura 58. Histograma de fuerza de actores.....	144
Figura 59. Representación Actores	145
Figura 60. Histograma 3MAO	146
Figura 61. Campo de batalla No. 1. Capoteando las balas.	147
Figura 62. Campo de batalla No. 2. No hay enemigo pequeño	148
Figura 63. Campo de batalla No. 3. Round 2.....	148
Figura 64. Resumen de escenarios posibles.....	159
Figura 65. Comparativo de escenarios según variables	163
Figura 66. Comparativo de variables según escenarios	164
Figura 67. Dispersión de los escenarios según el reto de sus hipótesis	164
Figura 68. Anhelos o criterios propuestos	165
Figura 69. Comparación de escenarios según los criterios	166
Figura 70. Resultados Ábaco de Regnier.....	169
Figura 71. Resumen de las hipótesis.....	170
Figura 72. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 1	172
Figura 73. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 2	172

Figura 74. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 3	173
Figura 75. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 4	173
Figura 76. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 5	173
Figura 77. Resultados de las hipótesis con sus probabilidades evaluadas.....	176
Figura 78. Histograma de escenarios con mayor probabilidad (núcleo tendencial).....	177
Figura 79. Probabilidades de ocurrencia y acumuladas de los escenarios.....	178
Figura 80. Dominó consecuencias escenario “Faltó un centavo para el peso”.....	179
Figura 81. Dominó consecuencias escenario “Una orquesta sin director”	180
Figura 82. Dominó consecuencias escenario “Cada quien por su lado”	180
Figura 83. Dominó consecuencias escenario “Una fiesta sin torta”	180

Listado de Tablas

Tabla 1. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas – Países con mayor potencial en el mundo	36
Tabla 2. Potencial de energía mareomotriz en Colombia.....	52
Tabla 3. Captura y almacenamiento de carbono por sectores.....	60
Tabla 4. Análisis de megatendencias – Transición energética en Colombia.....	71
Tabla 5. Análisis de tendencias / señales débiles – Transición energética en Colombia.....	74
Tabla 6. Patente Energía solar concentrada	97
Tabla 7. Patente Sistemas solares híbridos	99
Tabla 8. Energía solar despachable.....	100
Tabla 9. Energía solar termofotovoltaica.....	102
Tabla 10. Turbinas eólicas flotantes	103
Tabla 11. Turbinas eólicas flotantes	105
Tabla 12. Turbinas eólicas sin aspas.....	106
Tabla 13. Energía eólica en el aire.....	108
Tabla 14. Energía térmica oceánica.....	110
Tabla 15. Energía térmica oceánica.....	111
Tabla 16. Taller lluvia de ideas para definición de factores de cambio.....	124
Tabla 17. Definición de factores de cambio	130
Tabla 18. Variables estratégicas	136
Tabla 19. Definición de actores	140
Tabla 20. Retos y Objetivos.....	142
Tabla 21. Clasificación de los actores.....	144
Tabla 22. Matriz 3MAO (Matriz actores sobre objetivos orden 3 - ponderada).	146
Tabla 23. Espacio morfológico con hipótesis de futuro	151
Tabla 24. Combinación No. 1 “Oportunidad perdida”	157
Tabla 25. Combinación No. 2 “Crear es crear”	157
Tabla 26. Combinación No. 3 “Prometeo”	158
Tabla 27. Promedios y desviaciones de los escenarios.....	163
Tabla 28. Calificación de criterios por escenario.....	165
Tabla 29. Argumentos a favor y en contra de los escenarios posibles	168
Tabla 30. Formulación de hipótesis	170
Tabla 31. En caso de que se cumpla	174
Tabla 32. En caso de que NO se cumpla	175
Tabla 33. Probabilidades corregidas y sistema binario.....	176
Tabla 34. Representación de los escenarios con respecto a las variables en el sistema binario	177
Tabla 36. Estrategias propuestas.....	181

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar a nuestras familias porque con su ejemplo, apoyo y enseñanzas que nos impulsan a salir adelante y lograr nuestras metas.

Al Centro de Pensamiento Estratégico y Prospectiva, a la Facultad de Administración y a la Facultad de Derecho Minero Energético de la Universidad Externado de Colombia, por la confianza y apoyo depositados en el desarrollo del presente trabajo de grado y su exitosa culminación, también agradecemos a cada uno de nuestros maestros durante el programa por su apoyo a nuestra formación profesional y personal.

A nuestro maestro y director de grado, el Dr. Francisco José Mojica por su invaluable aporte y guía al presente proyecto.

A nuestros compañeros de la Maestría en Pensamiento Estratégico y Prospectiva, porque nos permitieron ampliar nuestra visión de futuro durante cada uno de los cursos compartidos gracias a sus diversas perspectivas, conocimientos y aportes.

Capítulo 1. Introducción

La transición energética, entendida como el proceso de transformación hacia sistemas energéticos sostenibles y descarbonizados, constituye uno de los mayores desafíos y oportunidades del siglo XXI. Este cambio busca mitigar los efectos del cambio climático, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y diversificar las matrices energéticas mediante el uso de tecnologías limpias e innovadoras. Los documentos de prospectiva energética de las agencias internacionales destacan la importancia de la electrificación limpia en la transición energética, reconociendo que durante este proceso los combustibles fósiles seguirán desempeñando un papel significativo, debido a la actual dependencia energética y económica, así como al desarrollo en curso de tecnologías de sustitución.

En el contexto global, compromisos como el Acuerdo de París establecen metas claras, incluyendo la limitación del aumento de la temperatura global a 1.5 °C para 2050 (UNFCCC, 2015), lo cual también representa un reto en cuanto a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero considerando que se requiere reducir aproximadamente 37 gigatoneladas de CO₂e con respecto a los niveles de 2022 (IRENA, 2023). Este esfuerzo global ha llevado a países como Colombia a replantear su modelo energético y desarrollar estrategias para una transición justa y sostenible.

Colombia ha sido un país históricamente dependiente de los combustibles fósiles como el petróleo, gas natural y carbón, el cual actualmente enfrenta importantes retos en su transición energética. En su matriz energética las fuentes fósiles representan el 76%; mientras que su matriz eléctrica está conformada principalmente por fuentes renovables como lo es la energía hidráulica, con una participación superior al 70%. Por otro lado, Colombia emite menos del 0,6 % de los GEI del mundo.

No obstante, el país cuenta con un alto potencial para integrar fuentes de energía renovable, gracias a condiciones geográficas que le permiten contar con altos potenciales energéticos para el aprovechamiento solar y eólico, por ejemplo, como en la región de La Guajira, en donde los niveles de irradiación solar superan en un 60% el promedio mundial, mientras que la velocidad de sus vientos alcanza en promedio más de 10 m/s, con factores de capacidad superiores al 70% (UPME, 2022).

Considerando los retos y oportunidades del país en su camino hacia la transición energética, se hace relevante comprender y anticipar los posibles cambios que puedan presentarse en el entorno. En este sentido, la prospectiva estratégica proporciona un marco metodológico que, a través del análisis de escenarios, permite diseñar estrategias resilientes y fortalecer la toma de decisiones informadas ante un panorama dinámico y un futuro incierto. Esto resulta esencial, dado que la transición energética no solo implica la adopción de nuevas tecnologías, sino también transformaciones estructurales en el mercado, la regulación, la infraestructura y el comportamiento de los actores involucrados.

1.1 Justificación

El avance hacia una transición energética en el país es relevante considerando su alta vulnerabilidad frente al cambio climático, debido a factores como su ubicación geográfica, biodiversidad y ecosistemas estratégicos sensibles, como los páramos, así como por sectores que se ven altamente impactados por el clima, como la agricultura y el sector eléctrico. Entre los retos o ejes problemáticos que enfrenta el país, identificados en el Documento CONPES de Transición Energética, se encuentra el garantizar la seguridad y confiabilidad, así como la reducción de emisiones de GEI asociadas al sistema energético, debido principalmente a las siguientes brechas: (i) ineficiencia en el uso de los recursos energéticos, (ii) alta dependencia en las exportaciones del país provenientes de las industrias extractivas, (iii) baja velocidad en el ascenso tecnológico en todos los segmentos y modos de transporte, entre otros. Con base en ello, es posible identificar las importantes oportunidades que tiene Colombia mediante el aprovechamiento de sus recursos energéticos disponibles, a la par que avanza en su proceso de transición energética.

El presente trabajo de grado se propone como un estudio prospectivo estratégico con el objetivo de analizar y construir escenarios de futuro de la transición energética en Colombia al 2040, teniendo como alcance el sector eléctrico colombiano. Este enfoque metodológico permite identificar factores de cambio, tendencias y actores clave que influirán en el desarrollo del sector energético en las próximas décadas (Godet, 2008), incluyendo herramientas como el análisis del entorno multitemporal, inteligencia competitiva, análisis morfológico, multicriterio, sistemas de

matrices de impacto cruzado (SMIC), escenarios posibles y probables, entre otros, para explorar innovaciones emergentes y su viabilidad en el contexto colombiano.

Mediante este estudio, se pretende responder preguntas críticas sobre las posibles tecnologías predominantes en el horizonte 2040, los actores sociales más influyentes y las estrategias que como país se pueden adoptar para superar las barreras actuales y maximizar el potencial de Colombia, así como contribuir al desarrollo sostenible, brindando un aporte para el diseño de políticas públicas y la toma de decisiones estratégicas en el ámbito energético, a través de la construcción de escenarios y el diseño de estrategias de transición.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Construir los escenarios de futuro para el desarrollo de la Transición Energética en Colombia y las estrategias del escenario apuesta al 2040.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis de inteligencia o vigilancia tecnológica con el propósito de identificar nuevas tecnologías, desarrollos, mejores prácticas y tendencias relacionadas a la transición energética.
- Identificar factores de cambio y variables estratégicas que impactan en el futuro desarrollo de la transición energética en el país mediante talleres aplicados a un focus group de expertos.
- Identificar los actores sociales y sus principales estrategias para influir en la toma de decisiones de la transición energética en el país.
- Establecer un “plan vigía” que permita precisar los mayores inconvenientes que se pueden presentar en el camino del futuro.
- Construir las estrategias y proyectos en el marco de la transición energética para materializar el escenario apuesta.

Capítulo 2. Estado del Arte

En el presente capítulo se presentará un análisis conceptual, contextual y de vigilancia tecnológica que permitirá establecer a partir de un análisis prospectivo estratégico, el avance de la transición energética en Colombia al 2040.

2.1 La Transición Energética¹

Para llegar a un concepto de transición energética, es necesario reconocer que la humanidad ha transitado por diferentes procesos de transición. En ese sentido, es preciso destacar que, la construcción del concepto no solo tiene un enfoque energético, sino que es un concepto que involucra diferentes sectores y disciplinas, así como discusiones en relación con la distribución de la riqueza, políticas públicas y, por supuesto, la diversificación de la matriz energética. Esta es una de las razones por las que, se considera importante partir de la definición de transición y de esta forma aclarar porque tiene una duración en el tiempo y debe estar acompañada de varios factores. Partimos de una primera definición, que es la que trae el Diccionario de la Real Academia Española en donde define transición Del lat. transitio, -ōnis como la “Acción y efecto de pasar de un modo de ser o estar a otro distinto” lo cual, aplicado al sector energético invita a revisar si ese modo distinto, no solo refiere a las fuentes de generación, que en este caso serían unas limpias, amigables con el medio ambiente y accesibles, sino a revisar toda la cadena de valor hasta el consumo y la forma en la que se regula la energía. Pero esa no es la única definición que trae la RAE, en donde se encuentra como una segunda definición de transición, una en la cual nos vamos a detener y es la que hace referencia a "Paso más o menos rápido de una prueba, idea o materia a otra, en discursos o escritos." Es esta definición la que soporta nuestra idea de que, la transición es un proceso y como tal implica un paso a paso que puede ser más o menos acelerado, pero conlleva la revisión de condiciones para que se lleve a cabo de forma segura e irreversible.

¹ Investigación desarrollada por el Dr. Luis Ferney Moreno y la Dra. Ana Paola Gutiérrez (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

El éxito de una transición energética no es qué tan rápido se realice, es que se tomen todas las precauciones para no dar pasos equivocados que implique poner en riesgo la seguridad energética, la sostenibilidad ambiental o social que lleven a una reversión. En ese sentido, consideramos que, a partir de la definición de transición, es posible hacer un cambio significativo en la matriz de generación, unido a varias acciones que *produzcan un efecto distinto a la inicial*. Es decir, que el proceso de transición actual en la cual se buscan cambios y salir de lo convencional si puede darse “más o menos rápido”, pero esto dependerá de la tecnología, de los recursos disponible y desde luego de tomar las mejores decisiones en las cuales el centro de la discusión siempre sea el ser humano.

Consideramos que el objetivo de la toma de decisiones frente a una transición energética exitosa es buscar, como lo señala el Consejo Mundial de Energía (2022), humanizar la energía, por ello cobra relevancia el *Trilema Energético* en donde se resalta los aspectos sociales y ambientales. En ese sentido, se considera que hay consenso en cuanto a que la transición implica un cambio frente a la forma tradicional o convencional en la que se venía adelantando un proceso y que, este cambio, debe darse de una forma más o menos rápida. Ahora, lo que se considera realmente interesante es que, en los procesos de transición, con independencia del escenario o sector al cual se quiera aplicar, ese cambio debe originar situaciones mejores a las anteriores.

Ahora bien, al hablar de transición energética, como lo han señalado varios estudios, entre estos los presentados por el Consejo Mundial del Energía (World Energy Council, 2020), el concepto de transición energética incorpora nociones como energías renovables, eficiencia energética, generación distribuida, seguridad energética, equidad energética (accesibilidad y asequibilidad) y sostenibilidad ambiental (World Energy Council, 2019) y se puede definir a través de varias tendencias, que a partir de este momento se señalarán aquí como las 5D,

La descarbonización, bajo la cual los sistemas modernos son diseñados para disminuir su contribución al cambio climático y mejorar su resiliencia (Williams et al., 2012); la descentralización, caracterizada por la integración de recursos energéticos distribuidos de generación y almacenamiento, que acercan el consumo a la fuente, permiten una mayor eficiencia y confiabilidad del sistema (Alanne y Saari, 2006) (Mengelkamp et al., 2018); la digitalización, dada por las tecnologías de información que permite nuevas

formas de interacción entre agentes, tanto nuevos como establecidos (Kagermann, 2015), la democratización, permitiendo mayor acceso, poder de decisión y conocimiento por parte de los usuarios de energía (Hufen y Koppenjan, 2015), y la desregularización, refiriéndose a la liberalización del mercado y la definición de nuevas estructuras de gobernanza, abriendo las puertas a nuevos agentes y modelos de negocio (Goldthau, 2014). (España y Gutiérrez, pp. 233-234 2020)

En suma, la transición energética es un proceso de carácter estructural que tiene como finalidad el cambio progresivo de las formas de cómo se genera, distribuye y comercializa (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2015) y se regula la energía.

A propósito de los pilares sobre los cuales se estructura la noción de transición energética, se hará mención primero a la seguridad energética y especialmente a la falta o riesgo de seguridad energética, representada en la ausencia o en una deficiente prestación del servicio de energía eléctrica, así como el acceso a otras fuentes modernas de energía, se relaciona de manera directa con la pobreza. (Corporación Andina de Fomento, 2013, p. 1) (Rodríguez Padilla, 2018). Varios autores han buscado definir la seguridad energética y la seguridad en el suministro, destacando la importancia en la satisfacción de la demanda nacional de energía (Energy International Agency [IEA], 2014), bajo las perspectivas de la soberanía, la robustez y la resiliencia (Cherp y Jewell, 2011, pp. 202-212) y la capacidad de ofrecer energía a precios asequibles (Sovacool et al., 2011, pp. 5846-5853). Todas estas características, se consideran comprendidas en la definición de la Agencia Internacional de Energía que considera que la seguridad energética es la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asequible (Energy International Agency, 2014).

El estudio de Cherp y Jewel (2011, pp. 202-212) permite evaluar tres aspectos de la seguridad energética: la robustez entendida como la adecuación y confiabilidad que puede tenerse frente a la existencia de los recursos y su facilidad de obtención, por ejemplo, relacionado con temas de infraestructura, condiciones atadas a fenómenos naturales. En general, situaciones que afecten la existencia, disponibilidad o precios. El otro aspecto es la soberanía, analizada desde la exposición a sufrir amenazas que la afecten, como, por ejemplo, invasiones o confrontaciones con otros países. Acá no solo se debe analizar las potenciales amenazas o

riesgos, sino su capacidad de reacción frente a estas. Finalmente, la resiliencia entendida como la capacidad de responder a diversas interrupciones (Jewell, 2011), no solo de orden ambiental, sino factores políticos.

Finalmente, en cuanto a la evaluación de la seguridad energética, y como paso previo para abordar la seguridad ambiental y social, se considera importante resaltar que la transición energética no solo obedece a fenómenos naturales o que esté estrictamente relacionado con temas ambientales. Los procesos de transición energética pueden estar relacionados con escasez o ausencia de recursos naturales que den lugar a buscar cómo garantizar la sostenibilidad energética, a decisiones políticas o a la innovación como ha sido el caso de las diferentes revoluciones industriales.

Ahora, frente a la seguridad ambiental y social, se hace necesario analizar las implicaciones que tienen la pobreza energética en la calidad de vida y pobreza de la población, así como en los impactos ambientales derivados de los usos de energía (García Ochoa, 2014, p. 20). Como lo señaló la CEPAL (2009) en su estudio Contribución de los servicios energéticos a los Objetivos de Desarrollo del Milenio y a la mitigación de la pobreza en América Latina y el Caribe:

En general, el acceso a servicios energéticos de calidad, como elemento fundamental de la reducción de la pobreza y la mejora de las condiciones ambientales de los grupos socialmente más vulnerables, es un tema que figura con poca relevancia en las políticas oficiales de los gobiernos. En los planes nacionales de desarrollo, las estrategias de reducción de la pobreza y los planes y estrategias energéticas de un número muy amplio de países de América Latina y el Caribe no se menciona la relación entre energía y pobreza, y cuando se habla de ella, no se la trata a fondo.

La seguridad ambiental y social son bases fundamentales dentro de la noción de transición energética, porque todo cambio que se pretenda debe revisar todas las aristas. Se considera que la correcta evaluación de los impactos, tanto sociales como ambientales, influye en acelerar o afianzar la transición energética. Aspectos como la pobreza energética, la diversificación de la matriz energética de cara a la incorporación de fuentes no convencionales

de energía renovable, los costos que se trasladan al usuario y, por supuesto, la importancia en reducir los GEI, unido a un uso racional y eficiente de la energía, son aspectos que no se pueden separar para su análisis. Todos estos aspectos deben ser analizados y verse reflejados en todos los instrumentos de planificación del territorio de cara a políticas públicas articuladas y coherentes que respondan a las necesidades de su país.

2.2 Panorama energético global y nacional²

2.2.1 Contexto

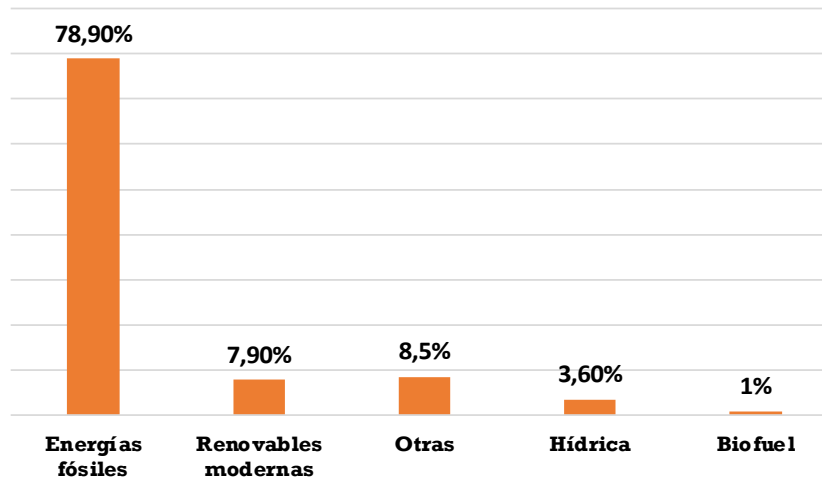
Según el World Energy Outlook 2024 de la Agencia Internacional de Energía (AIE), las inversiones en energías renovables han superado las de los combustibles fósiles por primera vez en la historia, marcando un cambio estructural en la matriz energética global. Sin embargo, los ritmos de descarbonización varían significativamente entre regiones:

- Europa y Estados Unidos han avanzado con políticas ambiciosas como el Green Deal y el Inflation Reduction Act, impulsando la electrificación, el hidrógeno y el almacenamiento energético.
- China lidera en capacidad instalada de renovables, especialmente solar y eólica, pero mantiene altas tasas de consumo de carbón.
- Latinoamérica cuenta con una matriz más limpia en comparación con otras regiones, con un fuerte peso de la hidroeléctrica y el crecimiento de la solar y eólica, aunque enfrenta desafíos en infraestructura y financiamiento.

Considerando lo anterior, a continuación, se presenta la matriz energética global y el comportamiento de precios por energéticos histórico y proyecciones a 2050.

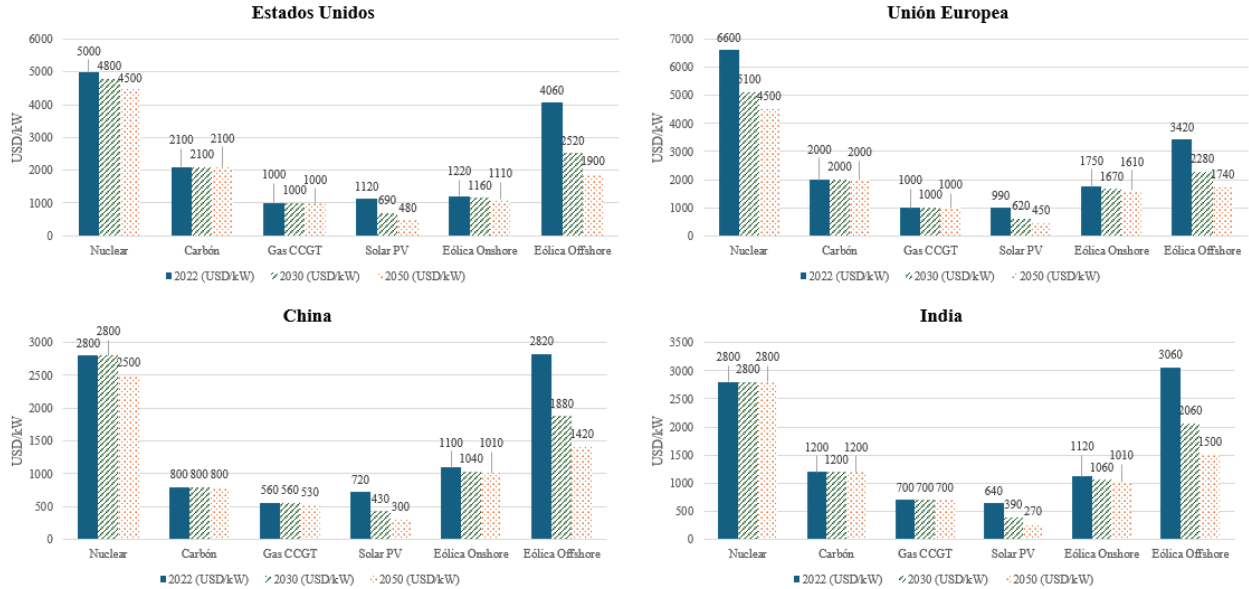
² Investigación realizada con el apoyo del Dr. Francisco José Mojica (Centro de Pensamiento Estratégico y Prospectiva, UEC).

Figura 1. Matriz energética mundial 2023



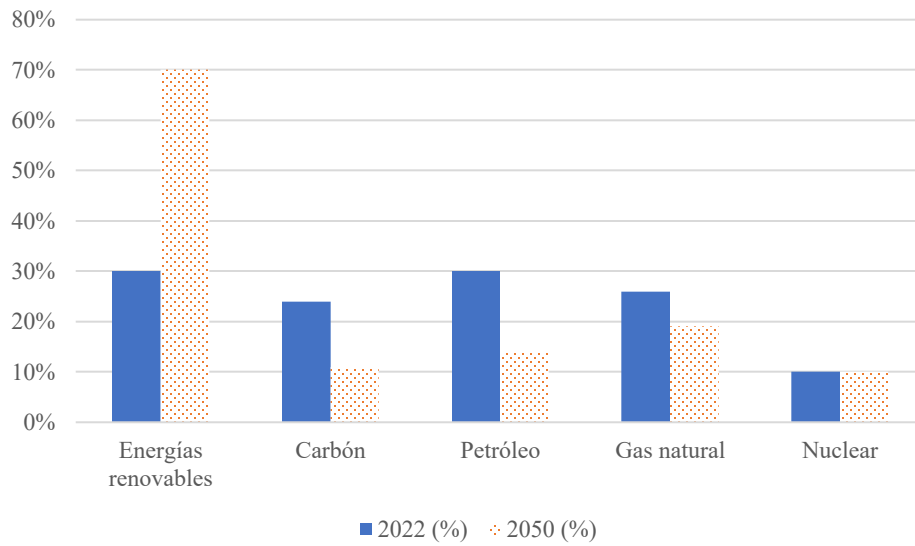
Fuente: Elaboración propia con base en REN 21

Figura 2. Costos de Capital de Tecnologías Energéticas Actual – Proyecciones (políticas establecidas)



Fuente: Elaboración propia con base en World Energy Outlook 2023

Figura 3. Proyección matriz energética global (políticas establecidas)



Fuente: Elaboración propia con base en World Energy Outlook 2023

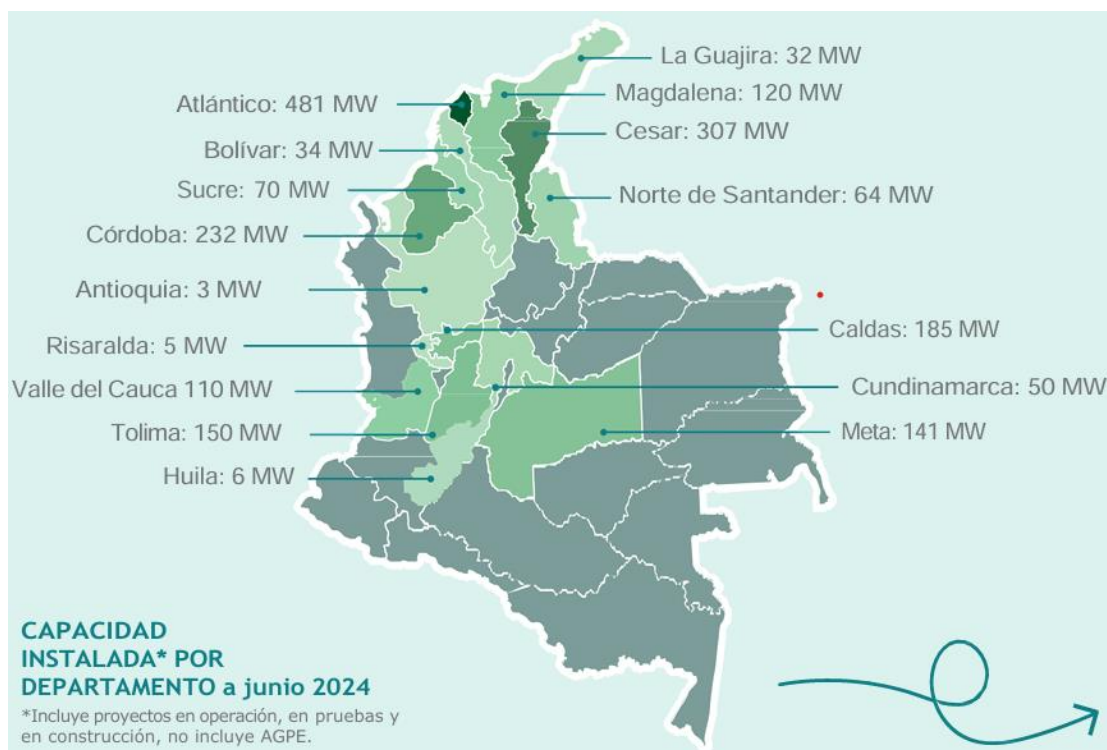
2.2.2 Situación actual en Colombia

Colombia cuenta con una geografía privilegiada que le otorga un gran potencial en la producción de energía. El país posee una amplia diversidad de fuentes energéticas, lo que le capacita para generar electricidad y abastecer sus necesidades internas e incluso exportar energía a países vecinos.

El país tiene ventajas competitivas en energías renovables no convencionales (ERNC), como en la región de La Guajira, en donde los niveles de irradiación solar superan en un 60% el promedio mundial, mientras que la velocidad de sus vientos alcanza más de 10 m/s, con factores de capacidad superiores al 70% (UPME, 2022).

Según lo plasmado en la Figura 4, Colombia tiene una capacidad instalada casi de 2000 MW de energías renovables. No obstante, sigue dependiendo del petróleo y el gas para su economía y financiamiento público, lo que genera un dilema en la implementación de la transición.

Figura 4. Capacidad renovable instalada en Colombia por región



Fuente: Informe SER Colombia, junio 2021

La producción de energía en Colombia se basa principalmente en fuentes hidroeléctricas, térmicas y, en menor medida, en fuentes no convencionales de energía, como la eólica y solar. Las hidroeléctricas son la principal fuente de energía eléctrica en el país, gracias a la abundancia de ríos y cuencas fluviales.

La generación de electricidad está dominada por la energía hidroeléctrica. Aproximadamente el 70% de la energía eléctrica producida en el país proviene de plantas hidroeléctricas, lo que en la matriz energética nacional equivale al 12.10% de la producción de energía, según el Ministerio de Minas y Energía.

Entre las principales hidroeléctricas se encuentran Hidro Ituango, Guatapé, El Quimbo y San Carlos, que representan una parte importante de la capacidad de generación hidroeléctrica del país.

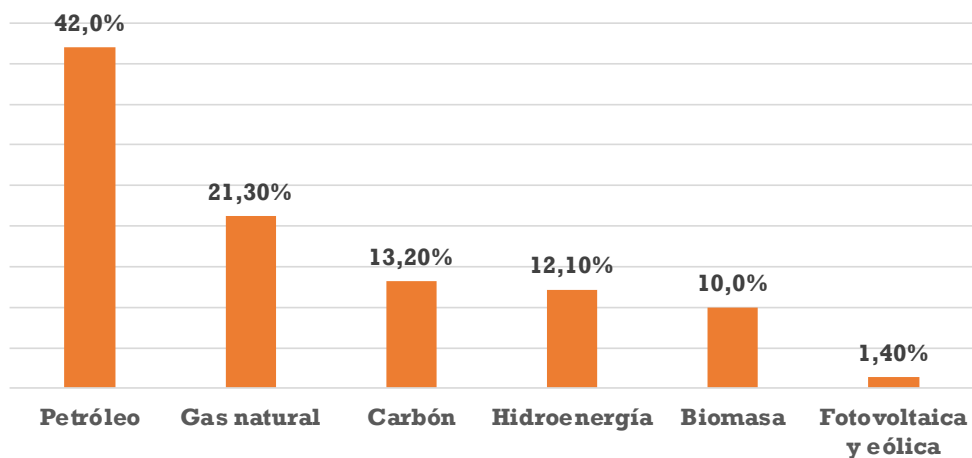
Las plantas termoeléctricas (carbón, gas natural y derivados del petróleo) también contribuyen significativamente a la producción de energía en Colombia.

El país está en proceso de expansión de su capacidad de generación de energía a partir de fuentes no convencionales, como la energía eólica y solar. Según datos de 2020, la capacidad instalada de energía solar en Colombia superaba los 70 MW y estaba en constante crecimiento. En cuanto a la energía eólica, se estima que la capacidad instalada era de alrededor de 300 MW en 2020.

Recientemente, la OECD (citado por La República, 2022) otorga el puesto 13 dentro de los países de esta organización, con una matriz de energía renovable que llega a 25%, por encima de países como Suiza, que registra un suministro de energía sostenible de 23,8%; Italia, con 19,4%; Canadá, con 17,3%; España, con 17%; Alemania, con 16,4%; Reino Unido, con 13,9%; y hasta Estados Unidos, que llega a 8,5% en esta categoría.

En la calificación de Colombia, juega papel importante la presencia de las energías de origen hídrico. De hecho, las energías renovables tradicionales (biomasa, eólica y fotovoltaica) representan solo el 11.4%, según el Ministerio de Minas y Energía, como se puede observar en el gráfico siguiente:

Figura 5. Matriz energética de Colombia 2022



Fuente: Elaboración propia con base en Ministerio de Minas y Energía. (2022).

Si comparamos la situación de Colombia con el comportamiento mundial, según el REN21 (REN21- 2023, p.14), la matriz energética planetaria muestra que en energías fósiles el

país señala un consumo del 76,5% (sumatoria de petróleo, gas natural y carbón) no muy distante del ítem correspondiente en la matriz mundial (78,9%). Véase gráfico a continuación.

En hidroenergía muestra un comportamiento superior al señalado para el planeta (Figura 5). Por esta razón ocupa el puesto 13 entre las naciones de la OECD. Pero en las renovables modernas (fotovoltaica y eólica) las cifras son menos estimulantes y el 10% de biomasa que significa consumo de leña y de bagazo no es muy alentador. No obstante, la situación colombiana significativa en energía hídrica no está exenta de desafíos. La variabilidad climática y las temporadas secas pueden afectar la disponibilidad de agua, aunada a la amenaza del fenómeno del Niño que amenaza con sequías cada vez más intensas, reduciendo así la capacidad de producción hidroeléctrica. Por ello, es fundamental diversificar la matriz energética e impulsar el desarrollo de fuentes no convencionales para garantizar la estabilidad y sostenibilidad del suministro eléctrico.

En los últimos años, Colombia ha avanzado en la promoción de fuentes no convencionales de energía, especialmente la solar y eólica, en donde, aunque tenemos un rendimiento muy inferior al comportamiento mundial (1.4% frente a 7.9%) estas fuentes son limpias y renovables, reduciendo la huella ambiental y contribuyendo a mitigar el cambio climático. Aquí tenemos una maravillosa oportunidad, porque la radiación solar y la velocidad del viento en ciertas regiones del país brindan condiciones óptimas para la generación de energía a partir de estos recursos.

Sin embargo, es necesario abordar desafíos como la integración efectiva de las energías renovables en la matriz, la inversión en tecnologías de almacenamiento de energía y la implementación de políticas que incentiven su desarrollo y uso. Asimismo, se debe garantizar una adecuada planificación y gestión para lograr una transición energética exitosa.

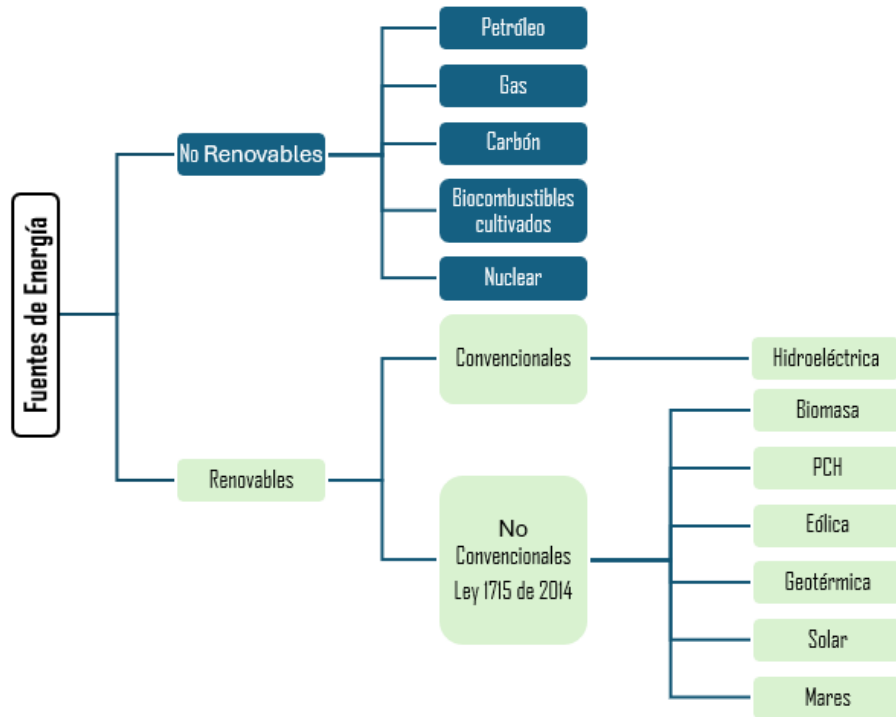
Colombia posee un gran potencial para la producción de energía gracias a sus fuentes naturales abundantes. La diversificación de la matriz energética, la promoción de fuentes no convencionales y una gestión sostenible son clave para asegurar un suministro energético confiable, sostenible y ambientalmente responsable en el país.

2.3 Estado y perspectivas por tipo de energía en Colombia

El país avanza hacia un nuevo modelo energético en el que la diversificación de la matriz y la descarbonización se han convertido en objetivos estratégicos, sin embargo, mientras que las fuentes no renovables siguen representando una parte significativa de su economía y seguridad energética, la creciente adopción de fuentes renovables convencionales y no convencionales plantea desafíos técnicos, regulatorios y financieros que deben resolverse para lograr una transición efectiva.

En este contexto, es clave entender el estado actual y las perspectivas de cada tipo de energía en Colombia, categorizándolas en tres grandes grupos:

Figura 6. Clasificación de fuentes de energía



Fuente: Elaboración propia con base en Ley 1715 de 2014

- Fuentes No Renovables: Incluyen el petróleo, el gas natural y el carbón, los cuales han sido históricamente la base del desarrollo económico del país. Si bien estas fuentes siguen desempeñando un papel crucial en términos de exportaciones, generación de ingresos

fiscales y estabilidad del sistema energético, su futuro está condicionado por la presión internacional hacia la descarbonización, la volatilidad de los precios y el agotamiento de reservas. A esto se suman estrategias como la captura y almacenamiento de carbono (CCS) y el gas como “combustible de transición”, que buscan reducir su impacto ambiental y prolongar su relevancia en el mediano plazo.

- **Fuentes Renovables Convencionales:** Principalmente representadas por la hidroelectricidad, que constituye cerca del 70% de la matriz eléctrica colombiana. Si bien es una fuente limpia y confiable, enfrenta desafíos significativos como la variabilidad climática (fenómenos de El Niño y La Niña), el impacto ambiental de grandes embalses y la creciente necesidad de diversificar el suministro para mejorar la resiliencia del sistema eléctrico.
- **Fuentes No Convencionales de Energías Renovables (FNCER):** Incluyen solar, eólica, biomasa y geotermia, que han ganado protagonismo en los últimos años gracias a la evolución tecnológica, la reducción de costos y los incentivos del gobierno. Estas fuentes tienen un alto potencial en Colombia, especialmente la solar y la eólica en regiones como La Guajira y los Llanos Orientales. Sin embargo, su integración masiva en el sistema enfrenta barreras relacionadas con infraestructura, interconexión, financiamiento y conflictos socioambientales en territorios estratégicos.

Adicionalmente, tecnologías emergentes como el hidrógeno verde, las microrredes y la digitalización del sistema energético están configurando nuevas oportunidades para el país, facilitando la descentralización y la optimización del uso de las fuentes renovables.

2.3.1 Fuentes No Renovables: Hidrocarburos³

El artículo 5 de la Ley 1715 de 2014 define las fuentes convencionales de energía como aquellos recursos de energía que se utilizan de forma intensiva y ampliamente comercializados en el país. En estas fuentes convencionales de energía encontramos los hidrocarburos, definidos en el diccionario minero expedido por la Agencia Nacional de Minería, como compuestos

³ Investigación desarrollada por el Dr. Juan Felipe Neira (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

orgánicos conformados por carbono e hidrógeno, formados por procesos naturales por la descomposición de plantas y animales, bajo condiciones especiales de enterramiento, pueden encontrarse en estado sólido (asfaltos), líquido (petróleos) y gaseoso (gas natural).

Petróleo. La producción de petróleo en Colombia en el año 2022 fue de 275 millones de barriles indicando un aumento de 6 millones con respecto al año 2021, lo que nos lleva a una relación Reservas Probadas/Producción (R/P) de 7,5 años.

En diciembre de 2022 se exportaron 14,3 millones de barriles de petróleo crudo, lo que representó una caída de 17% frente a diciembre de 2021. Así mismo, se prevé que la demanda mundial de petróleo aumente en 2,2 mb/d en 2023 hasta alcanzar 102,1 mb/d, un récord.

Lo anterior lo confirman cuatro de las cinco empresas más importantes de petróleo (Shell, Chevron, ExxonMobil y TotalEnergies), las cuales batieron su récord de beneficio neto en 2022, mientras que BP batió un récord dejando al margen elementos excepcionales. En total, en 2022 sumaron 151.000 millones de dólares de beneficios.

Por su parte, la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) no espera que la demanda se reduzca y, al contrario, vaticina un crecimiento para 2023 (+2,2 millones de barriles diarios (MBD) en 2023, tras la subida de +2,5 mbd en 2022).

La inversión en exploración para 2023 será de USD 1.240 millones, 4% menos que en 2022, cuando fue de USD 1.290 millones. “Se prevé que la producción de petróleo para 2023 sea de 770 mil barriles por día (BPD), 16 mil bpd más en comparación con la producción promedio de 2022; y en gas, un potencial de producción de gas de 1.183 millones de pies cúbicos diarios (MPCD)”.

El Informe destaca que las inversiones en gas natural siguen cobrando mayor importancia en el presupuesto de exploración. Para 2023 se proyecta que sean de USD 740 millones, lo cual representa el 60 % del presupuesto total de exploración.

Gas. Con respecto a las reservas probadas de gas, se situaron, al cierre de 2022, en 2.82 terapés cúbicos (Tpc), con una diferencia de -0.35 con respecto al año 2021. La producción de gas comercializado fue 0.39 terapés cúbicos lo que nos lleva a una relación Reservas Probadas/Producción (R/P) de 7.2 años.

Carbón. Colombia produce al año 60,9 millones de toneladas de carbón, una pizca con respecto a los 8.000 millones que se consumieron en el mundo en 2022, año récord. La exportación de este carbón representó el 21,5% de las exportaciones totales del país.

El 2022 fue uno de los años históricos para las exportaciones de minerales, puesto que sus valores tuvieron un importante incremento. Durante este año, las ventas externas llegaron a US\$20.387 millones, un alza de 52% frente al año directamente anterior y el mejor en la historia del país. Además, Colombia actualmente es el primer productor de carbón en América Latina y el decimosegundo en el mundo.

Así mismo, es preciso mencionar que el carbón es el mayor emisor mundial de dióxido de carbono (CO₂) relacionado con la energía -15 gigatoneladas (Gt) en 2021- y la mayor fuente de generación de electricidad, con un 36% en 2021, así como un importante combustible para uso industrial.

Actualmente hay un alza en el consumo de carbón en la unión europea, por situaciones como la invasión de rusia a ucrania, alto precio del gas y factores climáticos extremos. Para el 2030 se espera que el consumo se reduzca en un 50% al actual y para el 2040 la meta es que haya 0 consumo de carbón siguiendo las metas de cero emisiones de aquí a 2050.

Actualmente el carbón sigue suministrando algo más de un tercio de la electricidad mundial. Aunque en la mayoría de los países se está sustituyendo gradualmente el carbón para la generación de electricidad, seguirá desempeñando un papel crucial en la producción de hierro y acero hasta que se disponga de tecnologías más modernas.

India y China como mayores consumidores de carbón, harán que la demanda baje en la medida en que adopten energías renovables.

2.3.2 Fuentes Renovables Convencionales

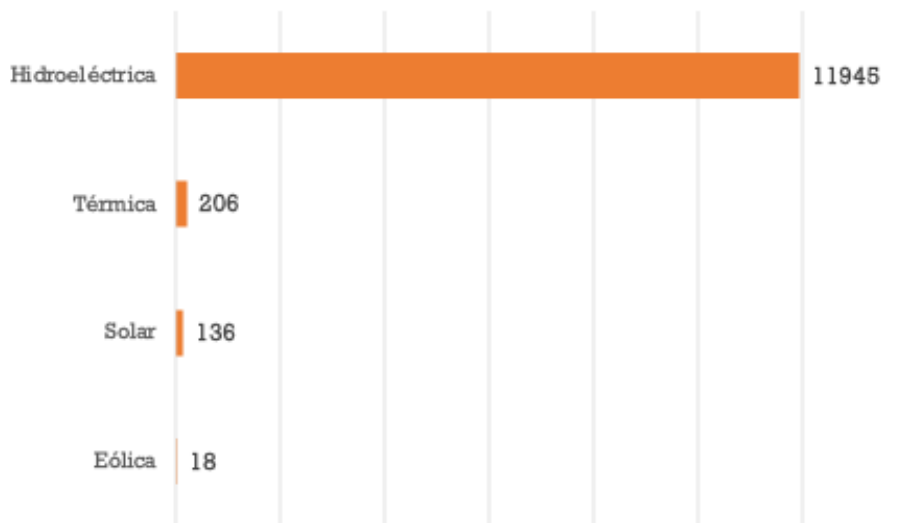
En Colombia, se considera la energía hidráulica como convencional, debido a su alta participación en la matriz energética del país.

Energía hidráulica. La historia de la hidroelectricidad en Colombia se remonta a principios del siglo XX, cuando se construyeron las primeras centrales hidroeléctricas para abastecer las necesidades locales. Sin embargo, fue en la década de 1960 cuando el país

experimentó un auge significativo en la construcción de represas hidroeléctricas, lideradas por proyectos emblemáticos como la Central Hidroeléctrica de Guavio y la Represa de Betania. Estas iniciativas no solo impulsaron el desarrollo económico, sino que también sentaron las bases para una dependencia de la hidroelectricidad en la matriz energética nacional.

Situación actual en Colombia: Hoy en día, más del 70% de la electricidad generada en Colombia proviene de fuentes hidroeléctricas, con una capacidad instalada que supera los 13,000 megavatios (MW). La Represa de Guatapé, con una capacidad de 2,400 MW, se destaca como la mayor contribuyente. El gráfico siguiente, muestra la situación hace cuatro años.

Figura 7. Capacidad instalada de energía eléctrica y otras fuentes de energía renovable en MW (2021)

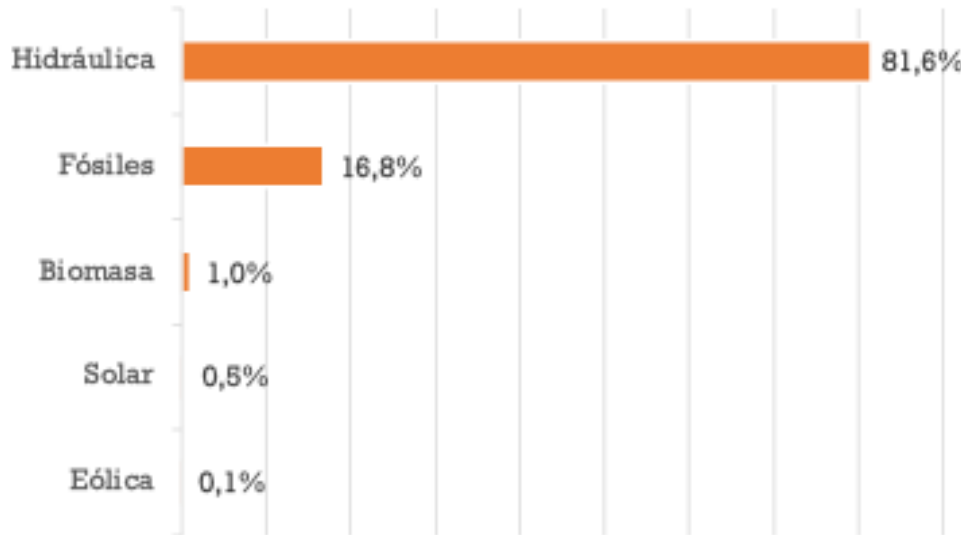


Fuente: Organización Latinoamericana de Energía - OLADE (2022).

De esta manera, en Colombia es clara la dependencia de la energía hidroeléctrica, exenta de las preocupaciones que suscita debido a la variabilidad climática y la vulnerabilidad ante fenómenos como El Niño, que pueden afectar los niveles de agua en los embalses. Por otra parte, están igualmente presentes fuentes conocidas como térmicas que provienen de combustibles fósiles como el gas y el carbón, los cuales son sometidos a un proceso termoquímico o termoeléctrico y son convertidos en energía eléctrica. Finalmente, Colombia ha diversificado su matriz energética con la inclusión de fuentes no convencionales, como la energía solar y eólica, para garantizar la sostenibilidad y la resiliencia del suministro eléctrico. Son

básicamente fuentes nuevas llamadas a tener un promisorio futuro, como se puede observar en la gráfica a continuación:

Figura 8. Generación de energía eléctrica en Colombia (2023)



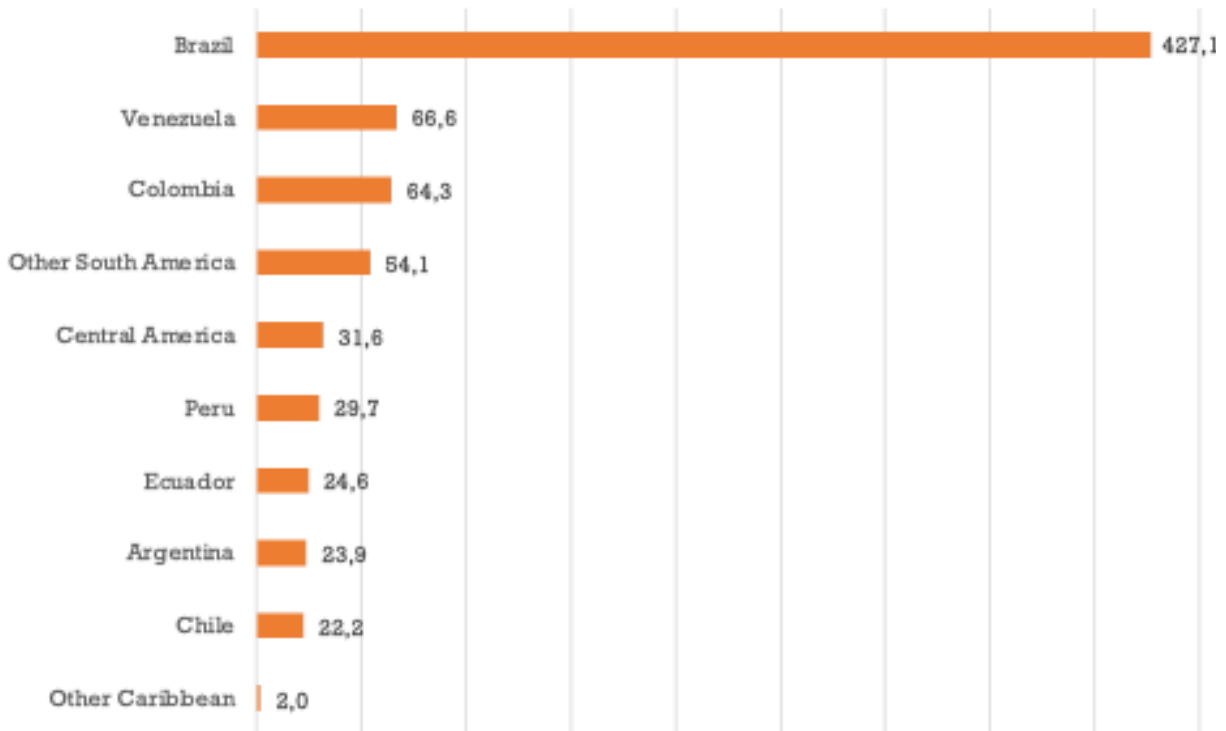
Fuente: Portafolio, 23 de junio 2023

Proyecciones Futuras: Las proyecciones indican un aumento en la capacidad hidroeléctrica colombiana con proyectos en desarrollo, incluida la esperada entrada en operación de la Central Hidroeléctrica de Ituango, que aportará 2,400 MW adicionales. Además, se espera una mayor integración de tecnologías renovables y la implementación de medidas para mejorar la eficiencia energética y reducir la huella de carbono. Un buen ejemplo es Noruega, que ha demostrado que es posible alcanzar una alta penetración de hidroelectricidad en la matriz energética manteniendo un equilibrio ambiental.

Suministro de Electricidad y Exportaciones: Colombia ha logrado establecer un robusto sistema de suministro eléctrico que abastece tanto a áreas urbanas como rurales. La exportación de electricidad a países vecinos, como Ecuador y Venezuela, ha sido una práctica común, consolidando la posición de Colombia como un importante actor en el mercado energético regional. Estas exportaciones no solo generan ingresos económicos, sino que también fortalecen los lazos de cooperación en la región.

Comparación con Otros Países: En comparación con otros países de América Latina, Colombia ocupa una posición destacada en la generación hidroeléctrica, según el “Statistical Review of World Energy” (2023). Brasil encabeza la lista regional con 427,1 TW, seguido por Venezuela, con aproximadamente 66,6 TW y Colombia se sitúa en tercer lugar con 64,3 TW, seguido por el resto de Sur América, Perú, Ecuador, Argentina y Chile.

Figura 9. Generación de energía hidroeléctrica en América Latina y el Caribe



Fuente: 2023 Statistical Review of World Energy

La diversificación de la matriz energética en Colombia, con un aumento significativo en la capacidad de generación solar y eólica, contrasta con la dependencia casi exclusiva de Brasil y Venezuela en la hidroelectricidad.

A nivel mundial, la dependencia de la hidroelectricidad varía considerablemente. Noruega, por ejemplo, obtiene más del 90% de su electricidad de fuentes hidroeléctricas, demostrando la viabilidad de una alta penetración sin comprometer la sostenibilidad ambiental.

Sin embargo, Colombia enfrenta desafíos adicionales, como la variabilidad climática, que requieren estrategias específicas para garantizar la estabilidad del suministro eléctrico.

Se puede concluir afirmando que Colombia ha evolucionado significativamente con los años, desde sus primeras etapas hasta su posición actual como la principal fuente de generación eléctrica. A medida que el país enfrenta desafíos ambientales y busca la transición hacia una matriz más diversificada, las proyecciones futuras apuntan a un desarrollo sostenible y la integración de nuevas tecnologías. La comparación con otros países resalta la importancia global de la hidroelectricidad y la necesidad de estrategias colaborativas para abordar los desafíos energéticos a nivel mundial.

2.3.3 Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER)

Geotérmica⁴. La Asociación Geotérmica Colombiana (AGEOCOL) define la energía geotérmica como aquella que “se produce durante la lenta descomposición de los elementos radiactivos en el núcleo de la Tierra. Este proceso es continuo y nunca se detiene, es por eso por lo que la energía geotérmica es una fuente de energía renovable”.

Por su parte, la Ley 1715 de 2014 la define como la “Energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que consiste en el calor que yace del subsuelo terrestre”. (Ley 1715, 2014, art. 5). Esta definición se debe completar con la definición consagrada en la Ley 2099 de 2021 “Ley de Transición Energética”, la cual señala en el Artículo 17 que “se entiende por recurso geotérmico el calor contenido en el interior de la tierra, y el cual se almacena o está comprendido en las rocas del subsuelo y/o en los fluidos del subsuelo”.

Actualmente la energía geotérmica se encuentra en las primeras etapas de estudios y desarrollo de proyectos, tanto a nivel nacional como internacional, aunque la discusión y el análisis de sus beneficios e impactos se ha intensificado los últimos años.

Situación actual en Colombia: Colombia goza de un gran beneficio para su desarrollo dada su ubicación geográfica. El Cinturón de Fuego del Pacífico, que atraviesa parte del territorio

⁴ Investigación desarrollada por la abogada e investigadora Gabriela Salas (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

colombiano, convierte determinados puntos geográficos en espacios propicios para el estudio y generación de energía geotérmica. Los sistemas geotérmicos relacionados con volcanes, que están siendo objeto de estudio se encuentran en:

- Paipa, departamento de Boyacá; mar de San Diego, El Escondido de Florencia y Cerro Bravo, en el departamento de Caldas;
- Nevado del Ruiz, entre los departamentos de Caldas y Tolima;
- Paramillo de Santa Rosa, departamento de Risaralda;
- Nevado de Santa Isabel, Nevado del Tolima y Cerro Machín, departamento del Tolima;
- Nevado del Huila, entre los departamentos de Huila, Tolima y Cauca;
- Puracé (Cadena de volcanes de los Coconucos) y Sotará, departamento del Cauca;
- Doña Juana, Galeras, Azufral, Cumbal y Chiles – Cerro Negro, departamento de Nariño y, Sibundoy, departamento de Putumayo. (Rodríguez Ospina et al., 2019, p.11)

Dentro de los antecedentes del estudio y exploración del potencial de la energía geotérmica en Colombia, se encuentra el Informe Final del Estudio de Recolección y Verificación de Información para el Desarrollo Geotérmico en Colombia, patrocinado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón en el año 2017. En él se enfatizó en la necesidad de un desarrollo legislativo propio; la sistematización de los trámites para obtener la licencia ambiental; la evaluación de los recursos y el desarrollo humano disponible, así como la revisión de las políticas de asistencia. (p.17). Como resultado, Colombia ha acelerado la actualización de su marco regulatorio, así como etapa de exploración y desarrollo de los primeros proyectos de generación por medio de la articulación de instituciones nacionales e internacionales.

El Ministerio de Minas y Energía en el 2022 expidió el Decreto 1318 de 2022 y la Resolución 40302 del 2022, para actualizar y complementar la normatividad relacionada con la generación de energía eléctrica mediante geotermia. Por su parte, dentro de la promoción por el desarrollo de proyectos se destaca el acuerdo entre Ecopetrol, Baker Hughes y la Central Hidroeléctrica de Caldas -CHEC-, del Grupo EPM, “para la realización de estudios de factibilidad de un proyecto de geotermia en el Valle de Nereidas, ubicado en el departamento de Caldas”. De igual forma, también se le ha dado un enfoque internacional al desarrollo de la

energía geotérmica en la región, a través del desarrollo del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño, Chiles - Cerro Negro, desarrollado entre Colombia y Ecuador.

Un aspecto que resalta y refuerza el desarrollo de la energía geotérmica en el país, es la designación de Colombia como líder de la Segunda Versión del Proyecto IGCP-636 de la UNESCO. El Proyecto tiene previsto su desarrollo entre el año 2020 a 2024 y cuenta con la participación del Servicio Geológico Colombiano (SGC), La Asociación Geotérmica Colombiana (AGEOCOL), La Universidad de Medellín (UDEM), y la Sección Colombia de WING (Women in Geothermal). Los principales objetivos del Proyecto son: “1) aumentar el conocimiento y la comprensión de los sistemas geotérmicos profundos; 2) realizar actividades de divulgación con grupos focales y comunidades, y 3) promover la instalación de bombas de calor geotérmicas”.

Finalmente, un punto en común estudiado para el desarrollo de la energía geotérmica en Colombia, como en otros países, son las limitaciones y alternativas de inversión. Respecto a las limitaciones, la Agencia de Cooperación Internacional del Japón señaló (Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 2017):

- Altos riesgos y costos de inversión inicial
- Competencia con otros recursos de energía convencionales.
- Limitaciones respecto a la regulación del mercado.
- Ubicación en áreas protegidas.

Finalmente, debe considerarse que, aunque la energía geotérmica es parte del marco regulatorio de las energías destacadas de la transición energética, lo que implica beneficios comerciales y tributarios a quienes invierten en su generación, expertos y entidades especializadas siguen siendo objeto de discusión los riesgos asumidos en las primeras etapas. Al respecto, Torres & Arancibia (2021) señala diferentes escenarios que deberán ser analizados según las condiciones geográficas y la capacidad de las partes intervinientes:

- El Estado asume la totalidad del riesgo.
- Perforación bajo un esquema de costos compartidos.
- Póliza de seguro de recursos geotérmicos.

- Incentivos fiscales aplicables a las etapas iniciales.

Desarrollo en América Latina y el mundo: Dentro de los antecedentes del estudio y desarrollo de la energía geotérmica en el plano internacional se destaca el Plan Global de Desarrollo Geotérmico, presentado en el 2013 como desarrollo del Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de la Energía (ESMAP). A partir de él se desarrollaron otros estudios como el Informe Técnico 0002/12 del Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de la Energía (ESMAP), que contiene el “Manual de Geotermia: Cómo planificar y financiar la generación de electricidad” y el Informe 024/16 sobre el “Análisis comparativo de estrategias para la mitigación del riesgo asociado a los recursos geotérmicos” del 2016.

De igual forma, se desarrolló el estudio “Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur” por parte de la Comisión Económica para América y el Caribe (CEPAL) del 2016, donde se analizaron los enfoques y perfectivas de varios países latinoamericanos, en especial Chile. Sobre este país, el Banco Mundial señaló en el 2021:

Chile tiene uno de los mayores potenciales estimados de recursos geotérmicos de América Latina, con un potencial probable de entre 2.000 MW y 3.000 MW. Chile, hasta recientemente se pensaba, era un mercado ideal para el desarrollo geotérmico, debida a la presencia en su territorio de tres factores determinantes: importante potencial de recursos geotérmicos; un sector eléctrico competitivo, con una importante cartera de potenciales compradores, y una fuerte legislación del sector energético. De hecho, la Ley de Energía Geotérmica de 2000 significó un importante aumento de solicitudes y adjudicaciones de concesiones. Sin embargo, informa el Banco Mundial (2018) si bien el gobierno ha otorgado más de 80 concesiones de exploración y doce concesiones de explotación en la última década, el único campo que ha estado operativo desde entonces es Cerro Pabellón (48 MW), operado por GDN15. (World Bank & Energy Sector Managment Assistance Program, como fue citado por Torres & Arancibia, 2021, p.9)

En el contexto europeo la energía geotérmica hace parte de las alternativas que despiertan un interés especial en ser exploradas y cuya financiación se hará a través del programa

Geotermia Profunda de la Unión Europea, que busca “Promover la realización de estudios de viabilidad geotérmicos para impulsar el conocimiento, localización y disponibilidad del recurso en el territorio nacional y, en particular, en las Islas Canarias”. Con base en él España a través del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) abrió en junio del 2023 la primera convocatoria para apoyar financieramente los estudios de viabilidad de energía geotérmica. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023, p. 27498).

En el contexto colombiano, el marco regulatorio de la energía geotérmica fue actualizado en el 2022, sentando las bases para los primeros proyectos geotérmicos en el país que deberán superar las barreras en materia de competencia, altos costos de inversión inicial y una correcta distribución de los riegos iniciales.

Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH)⁵. Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas son sistemas de generación de electricidad con capacidad hasta de 10 MW, suponen una caída de agua inferior a 15 m por lo cual no requieren grandes represamientos de agua, y permiten prestar sus servicios a pequeños asentamientos humanos.

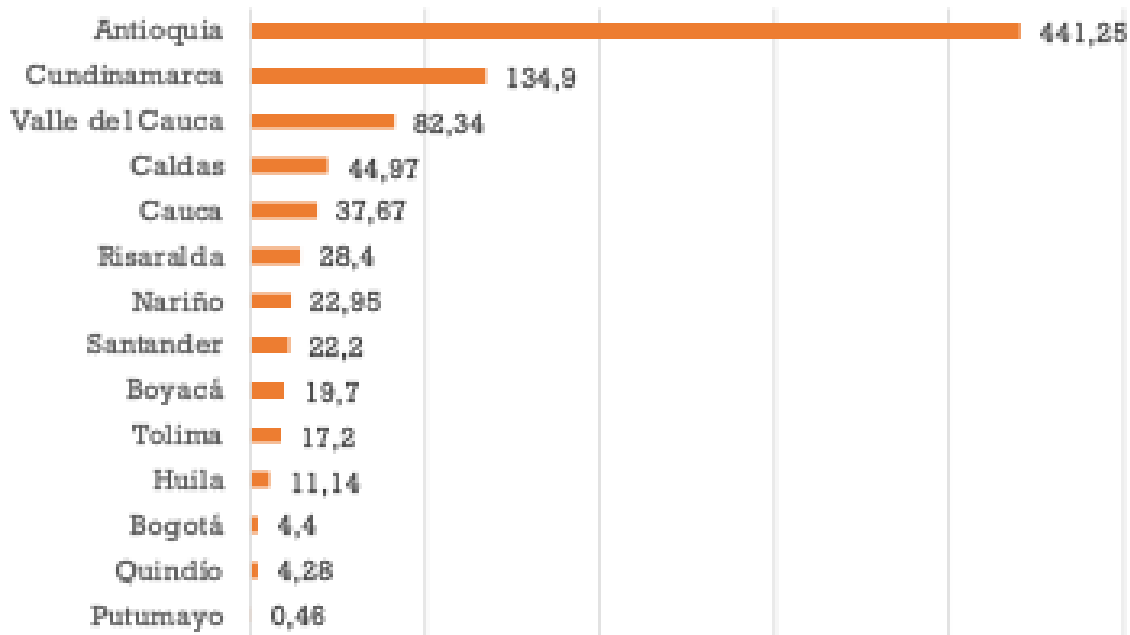
Estas soluciones energéticas emergieron a comienzos del siglo XX en virtud de su costo reducido de instalación y mantenimiento, muy débil impacto ambiental y una prolongada vida útil. De esta manera, se manifestaban como la solución para pequeñas poblaciones y se evitaba el empleo de fuentes térmicas contaminantes a base de energía fósiles, como las plantas de gasolina o ACPM.

Situación actual en Colombia: El país con su vasta riqueza hídrica ha estado aprovechando sus recursos naturales para la generación de energía eléctrica. En este contexto, las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) emergen como una opción clave para diversificar la matriz energética del país, promoviendo el desarrollo sostenible y la seguridad energética. Las PCH aportan destacados beneficios y desempeñan un papel crucial en el contexto de la transición hacia fuentes renovables.

⁵ Investigación desarrollada por la abogada e investigadora Gabriela Salas (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

Hasta 2019, Colombia contaba con 115 Pequeñas Centrales Hidroeléctrica que generaban 873,77 MW según Toro Jiménez (2022), las cuales estaban distribuidas geográficamente de la manera siguiente:

Figura 10. Generación de energía hidroeléctrica en América Latina y el Caribe



Fuente: Tomado de Toro Jiménez (2022)

Colombia ha dependido históricamente de la energía hidroeléctrica, que representa más del 70% de la capacidad instalada. En el caso concreto de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, según la Universidad Distrital (2022) (véase tabla a continuación) el país posee el potencial sin desarrollar más alto del mundo, por encima de naciones como China e India cuyas condiciones geográficas son igualmente favorables para producir este tipo de energía.

Tabla 1. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas – Países con mayor potencial en el mundo

País	Capacidad Instalada (MW)	Capacidad de Potencial (MW)
Colombia	214	25000
China	41900	63500

India	4485	21134
Chile	236	2113
Japón	3535	10327
Noruega	2571	7803
Vietnam	1666	7200
Turquía	2961	6500
Italia	3395	7073
EEUU	3612	10583

Fuente: ONUDI, Informe Mundial sobre el Desarrollo de la Pequeña Central Hidroeléctrica 2019.

Sin embargo, la vulnerabilidad asociada con la dependencia de grandes proyectos hidroeléctricos ha generado un interés creciente en las PCH como una alternativa más flexible y sostenible, por las razones que se enuncian a continuación:

- **Sostenibilidad Ambiental:** Las PCH tienen un menor impacto ambiental en comparación con las grandes represas, preservando la biodiversidad y evitando la emisión de gases de efecto invernadero.
- **Desarrollo Rural:** Al ubicarse en áreas remotas, las PCH pueden catalizar el desarrollo económico y social al generar empleo y mejorar la infraestructura local.
- **Estabilidad Energética:** La distribución geográfica de las PCH mejora la resiliencia del sistema eléctrico, reduciendo el riesgo asociado con la concentración de grandes proyectos en una sola región.

No obstante, el desarrollo de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, aún tienen desafíos por superar, a saber:

- **Trámites Administrativos:** La obtención de permisos ambientales y la complejidad en los trámites administrativos pueden ralentizar el desarrollo de PCH, requiriendo esfuerzos para simplificar y agilizar los procesos.
- **Financiamiento:** A pesar del crecimiento, el acceso a financiamiento sigue siendo un desafío para muchos proyectos, especialmente para aquellos liderados por comunidades locales.
- **Cambio Climático:** La variabilidad climática y los fenómenos extremos pueden afectar la operación de las PCH, destacando la importancia de la planificación resiliente.

Solar fotovoltaica y térmica⁶. La energía solar se considera una fuente inagotable y renovable, pues procede del sol para la generación de electricidad o la producción de calor. Este tipo de energía es obtenido a partir de la luz –solar fotovoltaica- o el calor proveniente del sol –solar térmica-, por lo que la tecnología utilizada para su producción varía de un tipo a otro.

Situación actual en Colombia: La energía solar en Colombia está en constante crecimiento y desarrollo. Es un país que se caracteriza por contar con algunas regiones de alta radiación, por lo que la energía solar fotovoltaica está ganando popularidad. La capacidad instalada de energía solar en Colombia ha incrementado en los últimos años. Según el informe estadístico de IRENA para el año 2023, Colombia empezó a registrar un incremento en el uso de este recurso energético a partir del año 2016 con 2 MW instaladas, a una capacidad instalada para el año 2022 de 491MW. Sin embargo, se resalta que el cien por ciento de la estadística del reporte corresponde a proyectos que utilizan energía solar fotovoltaica, pues en el país no se cuenta con registro de iniciativas a partir de fuente solar térmica.

Los datos anteriores son un reflejo de la información que registra la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), encargada de administrar el Registro de Proyectos de Generación en Colombia. Según el informe de avance proyectos de generación con corte a septiembre 2023, emitido por la Subdirección de energía eléctrica, el país cuenta con 203 proyectos de generación de energía solar vigentes, todos ellos a partir de tecnología solar fotovoltaica, pues a nivel global, la utilización de tecnología solar térmica no está masificada, dificultando su desarrollo en Colombia. El informe muestra además que, de los 203 proyectos fotovoltaicos, 90 de ellos en etapa de prefactibilidad y 107 de ellos en etapa de factibilidad, mostrando que el desarrollo en el país es aún incipiente. El informe revela que los 203 proyectos solares tendrían una capacidad instalada de más de 11 GW, compuestos principalmente por proyectos de más de 50 y 100 MW, lo que indicaría una mayor facilidad operativa y financiera para poner en operación proyectos fotovoltaicos a gran escala en el país.

Regulación aplicable para proyectos solares en Colombia: Si bien las leyes 142 y 143 de 1994 son neutrales respecto de las fuentes a partir de las cuales se puede generar energía, la Ley 1715 de 2014 introdujo en su artículo 5 una definición clara de lo que se entiende por

⁶ Investigación desarrollada por la abogada e investigadora Gabriela Salas (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), destacando el carácter renovable de los recursos incluidos en esta lista, así como su uso marginal en la matriz energética Colombia. Lo anterior, para incentivar su desarrollo y uso masificado en el país, así como garantizar un desarrollo sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético.

En consecuencia, aquellos recursos energéticos listados como FNCER tendrán incentivos tributarios y acceso a fuentes de financiación públicas nacionales e internacionales para su desarrollo, y se respaldarán como proyectos estratégicos, con connotación de utilidad pública e interés social, otorgándole primacía al desarrollo de estos proyectos sobre aspectos de ordenamiento del territorio, urbanismo, planificación ambiental. Asimismo, los proyectos de generación a partir de FNCER pueden hacer uso de figuras especialmente diseñadas para propiciar el desarrollo rápido y en ultimas, la consecución de fincas y en tiempos razonables de los principales permisos y requisitos que deben cumplir estos proyectos para su entrada en operación. Entre estas figuras, se resalta la declaratoria de utilidad pública e interés social (DUPIS), la declaratoria de proyectos de interés nacional y estratégico (PINES) y el régimen procesal especial para la imposición judicial de servidumbres de energía eléctrica.

La prestación del servicio de energía eléctrica en Colombia se encuentra regulado por las leyes 142 y 143 de 1994, que establecen un marco General en relación con el desarrollo de cada una de las actividades que componen la cadena de prestación de este servicio, regulación que su vez es complementada por las diversas leyes, decretos, resoluciones, circulares y acuerdos que son expedidos por el Congreso de la República, el Ministerio de Minas y Energía, la Comisión de Regulación de Energía Eléctrica y Gas, la Unidad de Planeación Minero Energética, el Consejo Nacional de Operación y demás autoridades competentes del sector.

Si bien la generación de energía a partir de fuentes no convencionales de carácter renovable goza de ciertos incentivos y beneficios mencionados con anterioridad, esta finalmente hace parte de la actividad de generación, definida en el artículo 14.25 de la ley 142 de 1994 como una actividad complementaria al servicio público de energía eléctrica y, en consecuencia, su ejercicio se encuentra limitado por la regulación aplicable a ésta, independiente del recuso energético utilizado.

En Colombia, el ejercicio de la actividad de generación es de libre ingreso y no requiere de permiso previo por parte del estado, permitiendo al desarrollador de proyectos de generación a partir de fuentes como la solar fotovoltaica o la solar térmica flexibilidad frente al mecanismo bajo el cual desea ingresar al mercado. Se resalta principalmente la entrada bajo propio riesgo como el mecanismo más utilizado en el sector para las FNCER; sin embargo, la regulación contempla mecanismos alternativos de ingreso como las subastas de cargo por confiabilidad, las subastas de suministro de energías renovables (Reguladas mediante Decreto 570 de 2018 y las Resoluciones No. 40791 de 2018 y No. 40795 de 2018 del Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Las normas mencionadas fueron declaradas nulas con el Consejo de Estado pues en su expedición hubo omisión del trámite de abogacía de la competencia que exige que los actos de regulación que limiten o afecten la libre competencia en los mercados deben tener un concepto previo de la Superintendencia de Industria y Comercio, viciándolos de nulidad. Sin embargo, las subastas no han sido anuladas y continúa expidiéndose normativa relacionada con estas, en razón a que las subastas se fundamentan en otras normas que, a la fecha, no han sido declaradas nulas), las asociaciones público-privadas (Figura regulada por la Ley 1508 de 2012), las áreas de servicio exclusivo (De conformidad con el artículo 114 de la Ley 1450 de 2011, “El Ministerio de Minas y Energía continuará diseñando esquemas sostenibles de gestión para la prestación del servicio de energía eléctrica en las Zonas No Interconectadas. Para este propósito, podrá establecer Áreas de Servicio Exclusivo para todas las actividades involucradas en el servicio de energía eléctrica.”), entre otros. La regulación permite a un generador, independiente de la fuente de uso, complementaria con otras actividades de la cadena de servicios, por lo que en el mercado podrán encontrar agentes que generan energía con fuentes como la solar fotovoltaica y térmica, y distribuye y comercializa la energía que genera.

Por último, la regulación establece aspectos diferenciales para los generadores, atendiendo a factores como la capacidad instalada de su proyecto de generación (independiente de la fuente, regulado por la resolución CREG 55 de 1994 que realiza la clasificación de los generadores, distinguiendo entre plantas de generación menores a 20 MW, conocidos como Plantas Menores y plantas iguales o mayores a 20 MW, conocidas como Plantas Mayores), o según la destinación que se dé a la energía producida. Lo anterior, pues se ha identificado la importancia de contar con un marco regulatorio flexible que facilite la inserción de los distintos

recursos en el mercado de energía y la comercialización de energía producida a precios competitivos, garantizando en últimas, la diversificación de la matriz de generación de la mano con la seguridad y confiabilidad del servicio de energía.

Eólica onshore y offshore⁷. El aprovechamiento del viento para las actividades humanas no es reciente sino que data desde el siglo pasado, no obstante, el aprovechamiento del viento para la generación de energía se ubica temporalmente en los años noventa cuando se compaginan tres factores: (i) desarrollos tecnológicos en sectores como la construcción, portuarios y de infraestructura; (ii) necesidad global de buscar fuentes alternativas a las que conformaban la matriz energética de los países; y (iii) concertación de escenarios para discutir planes, programas y políticas para el incentivo de acciones en contra del cambio climático. Desde una perspectiva técnica, la energía eólica consiste en la generación de electricidad producida por el viento (RAE, 2023) a partir de aerogeneradores que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. Desde una perspectiva jurídica, dependiendo del diseño normativo de cada país, la energía eólica es definida como una fuente no convencional de energía renovable, como sucede, por ejemplo, en el caso colombiano. Adicionalmente, cabe señalar que la energía eólica se clasifica dependiendo del lugar en el que se encuentra instalada la infraestructura de generación como energía eólica continental u “onshore” y energía eólica marina u “offshore”.

Situación mundial: El panorama de la energía eólica a nivel mundial se puede entender desde tres frentes: el nivel de incorporación de esta fuente en la matriz energética de diferentes países, el nivel de avance legislativo y la masificación de asociaciones y centros de investigación que tienen su foco en la energía eólica.

En efecto, en primer lugar, es posible identificar que la energía eólica viene ganando espacio en las matrices de generación de países como China, India, Australia, Alemania, España, Reino Unido y Brasil, siendo China el líder en energía eólica desde el año 2021 y proyectándose Europa como posible líder futuro en los próximos cinco años a propósito de los conflictos

⁷ Investigación desarrollada por la abogada especialista e investigadora Laura Juanita Villanueva (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

geopolíticos que le imponen la necesidad de acelerar la incorporación de fuentes alternativas de energía.

En segundo lugar, en materia normativa, cabe resaltar que existen dos grupos de países: (i) países que tienen reglamentación para proyectos de energía eólica onshore y offshore, como lo son China, India, Australia, Alemania, España, Reino Unido y Brasil; y (ii) países que tienen reglamentación para proyectos de energía eólica onshore y se encuentran discutiendo o en fases de aprobación la reglamentación de los proyectos eólicos offshore, como lo es Nueva Zelanda que a noviembre de 2023 se encuentra en fase de consulta de tres (3) proyectos normativos para reglamentar la energía eólica offshore (Ministerio de negocios, innovación y empleo, 2023).

Respecto de aquellos países que cuentan con regulación para la eólica onshore y offshore, en particular, se ha evidenciado que para la energía eólica onshore no existen marcos normativos específicos, sino que existen normas ambientales, técnicas, de procedimientos administrativos, incentivos tributarios y de mercado, entre otras, que son aplicables a todos los proyectos de energía a pequeña y gran escala con independencia de su fuente. Sin embargo, para la energía eólica offshore se ha identificado que los países mencionados han creado marcos normativos específicos, que integran reglas del derecho marítimo y portuario a la actividad de generación eléctrica. Por ejemplo, para el caso de Australia existen diversas normas que reglamentan de forma transversal los proyectos de energías renovables onshore destacándose, entre otras, la Ley “Renewable energy Act 2000” que es aplicable para proyectos eólicos, pero también para proyectos solares e hidroeléctricos onshore. No obstante, la Ley “Offshore Electricity Infrastructure 2021” se expidió en Australia para reglamentar de forma especial las licencias y el esquema de recuperación de costos que deben tener las granjas eólicas marinas.

Por último, es de resaltar que se han creado múltiples asociaciones y centros de investigación dedicados al estudio de la energía eólica como fuente protagonista en la transición energética que realizan estudios periódicos sobre el estado del arte de este tipo de energía, dentro de los que resaltamos al Global Wind Energy Council que ofrece una visión de los países que se encuentran desarrollando estos proyectos, WindEurope que recopila información sobre la energía eólica en Europa y Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) que centra la atención en el contexto latinoamericano.

Situación en América Latina: Cuando se analiza el estado del arte de la energía eólica desde una visión global, Brasil es el país latinoamericano que tiene mayor liderazgo, aunque debe mencionarse que los datos de capacidad instalada a diciembre del 2022 no logran superar ni el 7% de la capacidad instalada de energía eólica registrados por China (Energy Institute, 2023). Ahora, centrandolo el análisis desde una visión continental, es preciso advertir que existe una diferencia significativa registrada entre Brasil y países como Chile, Uruguay, Argentina y Colombia que permiten inferir que en la región aún se presentan diferentes retos para la incorporación de eólica onshore o eólica offshore en la matriz energética. Los principales retos que han sido identificados son comunes a todos los países latinoamericanos mencionados, como lo son falta de insumos para la cadena de suministro (Global Wind Energy Council, 2023), poca oferta a nivel país de profesionales capacitados para la construcción y puesta en marcha de proyectos eólicos a pequeña y gran escala (Organización Latinoamericana de Energía et al, 2019) y, en particular, problemas en la gestión de redes y conexión de proyectos. Estos retos han creado un movimiento común en Latinoamérica de protagonismo de la energía eólica offshore por requerir menor capacidades operativas y encontrarse alejada de zonas de conflictividad social.

En esta medida, tenemos que en Chile existe reglamentación de la energía eólica desde el año 2006, pero desde el año 2021 ha tomado fuerza esta fuente gracias al proyecto de ley para modificar la Ley sobre bases generales del medio ambiente y regular la construcción de complejos de aerogeneradores en espacios marítimos. En cuanto a Uruguay se destaca que existe normativa marco del sector eléctrico y de promoción de inversiones aplicable a todos los proyectos de energía renovable, incluidos los proyectos eólicos onshore, no obstante, el protagonismo gira en torno a la eólica marina gracias a la hoja de ruta para el hidrógeno verde publicada en el año 2022 por el Ministerio de Industria, Energía y Minería en el que se destaca el programa “H2U Offshore”. Respecto a Argentina, a diferencia de Chile y Uruguay, no existen iniciativas normativas que centren su atención en la eólica offshore, no obstante, existe una ley marco que habilita las inversiones en proyectos eólicos onshore como offshore.

Situación en Colombia: El escenario colombiano se encuentra acorde con el fenómeno latinoamericano de protagonismo a la energía eólica offshore, luego de varios años de

reglamentación e intentos de masificación de proyectos eólicos onshore. A continuación, presentamos los principales elementos que rigen la energía eólica en Colombia:

- **Energía eólica offshore:** La energía eólica offshore en Colombia se reglamentó por primera vez por la Autoridad Marítima por medio de la Resolución 0794 de 2020 “por medio de la cual se adiciona el Título 10 a la Parte 3 del Reglamento Marítimo Colombiano en lo concerniente a la fijación de criterios técnicos y procedimiento para otorgar concesiones en proyectos de desarrollo y/o construcción de infraestructura de generación de fuentes no convencionales de energía renovables FNCER a realizarse en jurisdicción de la Dirección General Marítima”. Posteriormente, el Gobierno Nacional publicó la Hoja de ruta para el despliegue de la energía eólica costa afuera en Colombia. En el año 2022, el Consejo Nacional de Política económica y social publicó la Política de Transición energética del país en la que destaca a la energía eólica offshore con un potencial de despliegue entre el año 2023 y 2025. Por último, gracias a la coordinación entre la Autoridad marítima y el Ministerio de Minas y Energía fue publicada la Resolución 40284 de 2022; y recientemente, el administrador de la primera ronda de asignación convocada publicó el borrador de los términos específicos que orientarán el proceso competitivo.

Como se observa, actualmente existe un marco regulatorio para la puesta en marcha de proyectos eólicos en espacios marítimos. El esquema para este tipo de proyectos implica obtener un permiso de ocupación temporal que habilita al interesado para desarrollar actividades de medición y recolección de datos e información para determinar la viabilidad del proyecto y obtener licencias y permisos para construirlo, para que después se inicie la construcción y operación del proyecto en virtud de una concesión.

- **Energía eólica onshore:** La energía eólica onshore en Colombia se nutre de una serie de reglas aplicables a todos los proyectos de generación con fuentes no convencionales de energía renovable que determina los requisitos de licenciamiento ambiental o permisos ambientales, los incentivo tributarios, el régimen de consulta previa cuando su desarrollo tiene un impacto en comunidades que se encuentren en el área de influencia del proyecto y que habilita la transacción de la energía proveniente de estos proyectos en el mercado de energía mayorista. Pese a lo anterior, a la fecha, han existido más de 20 proyectos de

energía eólica en el país que no han entrado en operación por diferentes factores ambientales y sociales y actualmente existen únicamente dos parques eólicos inyectando energía al sistema interconectado nacional. (Ser Colombia, 2023)

Nuclear⁸. De acuerdo con el Organismo Internacional de Energía Atómica, la energía nuclear es una forma de energía que se libera desde el núcleo de los átomos y puede producirse a partir de fisión (cuando los núcleos de los átomos se dividen en varias partes) o mediante fusión (cuando estos se fusionan). La fisión nuclear es el método actual por el cual se obtiene energía, mientras que la tecnología para generar electricidad a partir de la fusión se encuentra en fase de I+D.

La energía nuclear ha sido objeto de intensos debates en todo el mundo, y Colombia no es la excepción. En un contexto global donde la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y bajas en carbono, la energía nuclear se presenta como una opción controvertida, pero a la vez enigmática.

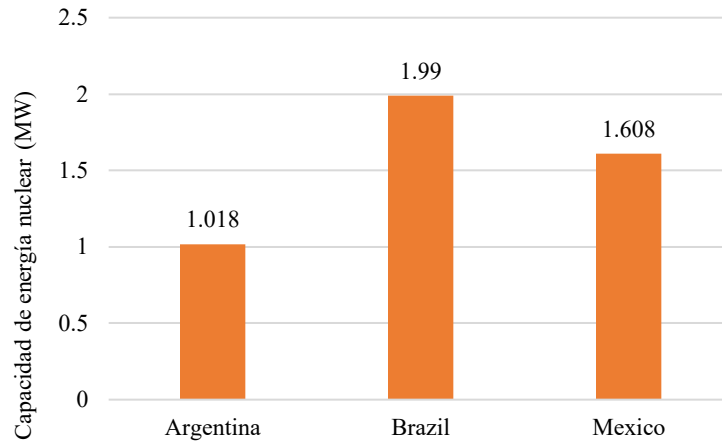
Situación actual en Colombia: Colombia actualmente no cuenta con plantas nucleares para la generación de electricidad. Según datos del Ministerio de Minas y Energía de Colombia, hasta el año 2023, la matriz energética del país, con una capacidad efectiva neta de generación de 18,777 MW está dominada en un 66.8% por hidroeléctricas, seguido por térmicas en un 30.5% y un 2,7% que se distribuye entre otras fuentes convencionales, según Corficolombiana.

A pesar de que se han explorado propuestas para la construcción de centrales nucleares, estas no han avanzado debido a preocupaciones sobre la seguridad, los costos y la gestión de residuos nucleares.

Comparación con Latinoamérica: En Latinoamérica, la energía nuclear ha sido adoptada en diferentes grados por algunos países. Según “Global Energy Monitor”, Argentina, Brasil y México son ejemplos destacados que han desarrollado programas nucleares para la generación de electricidad y aplicaciones médicas. Argentina, en particular, obtiene alrededor del 6% de su electricidad de centrales nucleares.

⁸ Investigación desarrollada por la abogada especialista e investigadora Laura Juanita Villanueva (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

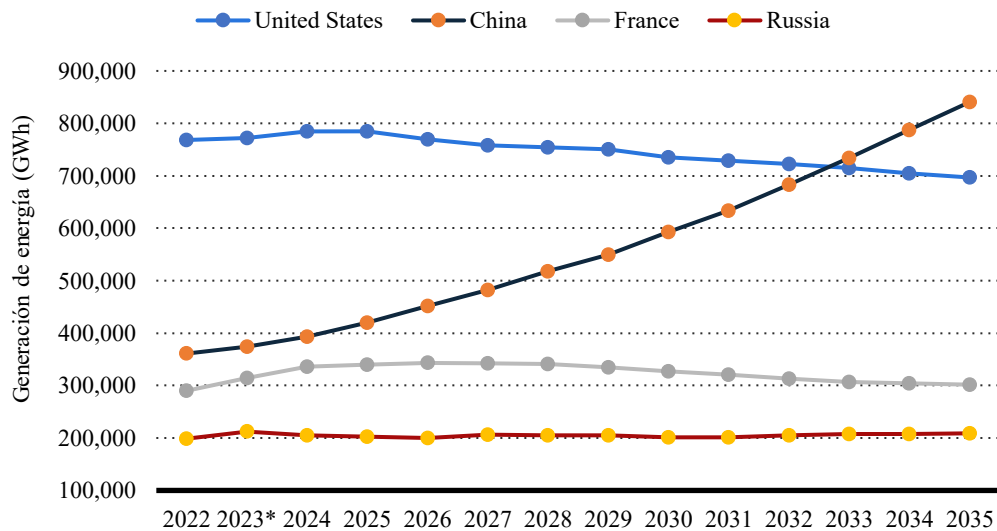
Figura 11. Capacidad de energía nuclear en tres países de América Latina



Fuente: Global Energy Monitor – Statista.

Perspectiva Mundial: A nivel mundial, la energía nuclear desempeña un papel diverso en la matriz energética de diferentes países. Según datos de “Global Energy Monitor” la producción de energía nuclear estará en manos de cuatro países: Estados Unidos, Francia y Rusia. China se proyecta como el país que estará a la cabeza de la energía nuclear en el año 2030.

Figura 12. Países líderes de la generación de energía nuclear proyección para 2035



Fuente: Global Energy Monitor – Statista

La energía nuclear ha sido destacada por su capacidad para generar grandes cantidades de electricidad de manera continua; sin embargo, las preocupaciones ambientales, la gestión de residuos y la posibilidad de accidentes nucleares han generado divisiones y debates en todo el mundo.

Consideraciones para el Futuro de la Energía Nuclear en Colombia: Colombia enfrenta la necesidad de equilibrar la demanda creciente de energía con la responsabilidad ambiental. La introducción de la energía nuclear debe ir acompañada de un análisis exhaustivo de los riesgos y beneficios, así como de la implementación de medidas rigurosas de seguridad y gestión de residuos.

Es esencial que Colombia considere las lecciones aprendidas en otros países latinoamericanos y del mundo. La transparencia en la toma de decisiones, la participación pública y el compromiso con estándares internacionales de seguridad son fundamentales para establecer una base sólida para cualquier programa nuclear.

Biomasa y Biogás⁹. A través de la política “Fundamentos para el desarrollo de una política nacional de bioenergía” el gobierno nacional destacó el provecho que podría obtenerse de los diferentes residuos que surgen de la actividad de la agricultura en el país y como al someterlos a procesos químicos del que se obtenga biomasa, biocombustibles y bioenergía pueda suministrarse la electricidad y el suministro de gas como combustible en las zonas rurales.

En el estudio se estableció que los principales generadores de biomasa son los residuos agrícolas con 73,7%, seguido por los pecuarios participa con el 26,1% y la poda y centros de acopio muestran una participación marginal con el 0,1%. También se pudo establecer que la capacidad nacional de biomasa que se produciría sería de 1300 y 1400 PJ/año para el 2030 mientras que, para el mismo periodo, países como Francia, Alemania y España tienen una proyección de tan solo 350 y 300 PJ/año muy por debajo del potencial nacional.

Para el año 2014 la legislación colombiana reconoció a la Biomasa como una fuente energética renovable: La Energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía

⁹ Investigación desarrollada por la abogada especialista e investigadora Daniela Fernanda Gamboa (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

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.

A través de los Informes anuales del registro de proyectos de generación de electricidad publicados por la UPME, se observa que la inscripción de proyectos energéticos a partir de la Biomasa en Colombia es inferior a los de otras fuentes. En 2021, de los 155 proyectos de energía inscritos 2 eran de biomasa; en 2022, 231 proyectos energéticos, pero ninguno correspondía a Biomasa; y en agosto del 2023, de 138 proyectos registrados 3 corresponden a la Biomasa.

En el Plan Estratégico Nacional PEN 2020-2050, se estableció que los energéticos más usados por la industria colombiana son el gas natural (29%), el carbón mineral (28%), el bagazo (20 %) y la energía eléctrica (20%).⁷; mientras que para los países de Latinoamérica y el resto del mundo oscila entre el 25% y 7% respectivamente. En el sector residencial, año 2018, los más usados fueron la leña para zonas rurales con 37 % del cual con una cantidad de biomasa correspondiente al 10.84% de los hogares, la energía eléctrica con 35 %, el gas natural con 20 % y el GLP con 7 %. En este ámbito, Colombia tiene mayor uso de Biomasa y Gas Natural que el usado por mundo y Latinoamérica.

De otra parte, con relación con el Biogás, la Comisión de Regulación de Energía y Gas lo describe como la mezcla de gases que surgen de la descomposición anaeróbica de materia orgánica o biodegradable que está compuesto por metano, dióxido de carbono y monóxido de carbono. El Biogás al someterse a tratamientos con concentraciones altas de metano y eliminar los componentes tóxicos se obtiene el Biometano, el gas que puede transportar las tuberías existentes para el servicio público domiciliario de gas.

El PEN 2020- 2050 pronostica que Colombia cuenta con un alto potencial técnico para la generación de biogás residual con una cifra de 941.360.642 m³ por año, lo que permitiría la disminución anual de dióxido de carbono en 1.5 Mt y que a su vez complementarían la demanda de gas natural en un 26%.

Dentro de las ventajas que identifica la PEN 2020 – 2050 del biogás está la sustitución de combustibles líquidos y carbón por gas natural que este compuesto en parte por el biogás, así

como su implementación como combustible en el sistema de transporte masivo, de carga y livianos y como sustituto del consumo de leña para las zonas rurales.

Desde la perspectiva internacional, la Comisión Europea presentó el programa Plan REPowerEU que busca desplegar la producción de energías renovables para reducir la dependencia a los combustibles fósiles rusos, con el uso de diferentes fuentes energéticas, y la generación de 35.000 millones de metros cúbicos de Biometano para el año 2030.

La Comisión estableció como medidas para la producción y uso sostenible del Biometano: i) instaurar una asociación industrial del biogás y el biometano para impulsar la cadena de valor de los gases renovables; ii) alentar a los productores de biogás para crear comunidades energéticas; iii) dar incentivos para la conversión de biogás a biometano; iv) adaptación de infraestructuras existentes y despliegues de nuevas para el transporte de biometanos por las redes de gas de la UE; incentivar la investigación; y v) Facilitar el acceso a financiación para estos proyectos.

Dados los grandes potenciales de la Biomasa y el Biogás, el gobierno colombiano ha desarrollado normas, estrategias y políticas para incentivar el uso y obtener los beneficios energéticos y económicos de los que se puede beneficiar el país:

- Resolución N° 030 de 2018. Regula la autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el sistema interconectado nacional con disponibilidad de entrega de excedentes por FNCER.
- Resolución Creg 240 de 2016. Norma que regula las actividades de producción, transporte y distribución y comercialización para el servicio público domiciliario de gas combustible con biogás y biometano.
- Ley 2036 de 2020. Norma que permite al gobierno nacional financiar la participación de las Entidades Territoriales en proyectos de generación, distribución, comercialización y autogeneración a pequeña escala y generación distribuida con FNCER.
- Decreto 802 de 2022. Esta norma tiene como objeto el incentivo al aprovechamiento y tratamiento residuos sólidos y definir el cálculo del valor, facturación, recaudo, asignación y uso de los incentivos, así como su seguimiento y control en todo el territorio nacional.

- Resolución 087 de 2016. Esta resolución determinas las condiciones de seguridad y tarifarias para el desarrollo de la prestación de servicio de con biogás.
- Decreto 1784 de 2017 y Resolución 0938 de 2019. Reglamentan las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de los residuos sólidos en la prestación del servicio público de aseo.
- Decreto 1287 de 2014. Tiene por objeto establecer los criterios para el uso de los biosólidos obtenidos a partir de dichos lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.
- CONPES 3874 de 2016. Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. Política pública que busca la materialización de gestión integral de los residuos sólidos no peligrosos, que tenga presente el interés social, económico, ambiental y sanitario para el fomento de la economía circular fomente el desarrollo sostenible, la adaptación y mitigación al cambio climático.
- CONPES 3934 de 2018. Política de crecimiento Verde. Política con diversificación de actividades económicas para el aprovechamiento de los recursos naturales en el sector económico, basado en la eficiencia y productividad a partir de tecnologías eficientes, capacitando el capital humano, pero sin fomentar impactos ambientales.
- Plan Nacional de Negocios Verdes 2022. Política que ofrece directrices, incentivos y herramientas para fomentar la creación y acogimiento de los negocios ya existentes con un enfoque verde.

Oceánicas¹⁰. Las energías oceánicas, compuestas por diversas fuentes como la mareomotriz, undimotriz, energía del gradiente salino y maremotérmica, representan un potencial significativo para diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de fuentes convencionales en Colombia y América Latina. Este ensayo se enfocará en examinar estas formas de energía en Colombia, evaluando su viabilidad y comparándolas con otros países de la región.

¹⁰ Investigación desarrollada por la abogada especialista e investigadora Daniela Fernanda Gamboa (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

Situación en Colombia:

- **Mareomotriz:** La energía mareomotriz se genera aprovechando las mareas y corrientes. En Colombia, la costa atlántica y pacífica ofrece un potencial considerable. Sin embargo, la tecnología para la generación de energía mareomotriz está aún en desarrollo, y se requiere una inversión significativa para su implementación a gran escala. Comparativamente, países como Corea del Sur y Canadá han avanzado en esta área, destacando la necesidad de acelerar la investigación y desarrollo en Colombia.
- **Undimotriz:** La energía undimotriz, derivada de las olas, podría ser especialmente relevante en la costa colombiana del Pacífico. La falta de una infraestructura adecuada y la limitada inversión en investigación y desarrollo han frenado su progreso. Aunque Colombia posee recursos naturales valiosos, la comparación con Brasil, que ha implementado proyectos piloto exitosos, destaca la necesidad de políticas más sólidas y cooperación público-privada.
- **Energía del Gradiente Salino:** La energía del gradiente salino aprovecha la diferencia de salinidad entre el agua de mar y el agua dulce. Colombia, con su extensa red de ríos, podría beneficiarse de esta tecnología. Aunque la investigación ha avanzado, la falta de incentivos y regulaciones claras ha limitado su desarrollo. Contrastando con España y Singapur, que han logrado implementaciones exitosas, se destaca la necesidad de un marco normativo robusto en Colombia.
- **Maremotérmica:** Esta forma de energía combina la diferencia de temperatura entre las capas superficiales y profundas del océano. Colombia, con su posición ecuatorial, podría aprovechar esta fuente. No obstante, la falta de inversiones significativas y el desconocimiento público sobre esta tecnología han limitado su adopción. La experiencia de Japón y China resalta la importancia de la educación pública y la cooperación internacional para impulsar proyectos maremotérmicos.

Comparación con América Latina: A nivel regional, Colombia se encuentra rezagada en la implementación de tecnologías oceánicas en comparación con países como Chile y México. Chile ha establecido proyectos mareomotrices y undimotrices exitosos, mientras que México

lidera en proyectos de gradiente salino. Estas diferencias señalan la necesidad de políticas específicas y estrategias adaptadas a las características geográficas y climáticas de cada país.

Colombia cuenta con un importante potencial de producción de energía mareomotriz, gracias a que sus mareas son superiores a los 3 metros, en particular en el Pacífico y podría suministrar hasta 120 MW en particular Bahía Málaga y la Ensenada de Tribugá.

La tabla siguiente muestra las opciones que posee Colombia en el Pacífico.

Tabla 2. Potencial de energía mareomotriz en Colombia

Sitio	Area [km ²]	Pi [MW]	Em [GWh]	Presa [m]	L/Em	A/L*10 ³
Ensenada De Utría	4	7.9	17.4	1100	63.2	3.6
Boca Virudó	9	18	39.0	400	10.3	22.5
Ensenada Catripe	11	21.8	47.7	700	12.6	18.3
Río Baudó	7	13.9	30.4	600	19.7	11.7
Bocana Usaragá	7	13.9	30.4	1500	49.3	4.7
Río Decampado	16	31.7	69.4	2500	36.0	6.4
Bahía Ijuá	8	15.8	34.7	800	23.1	10.0
Bahía Málaga	80	160	347.0	2700	7.8	29.6
Boca Cajambre	6	11.9	26.0	1000	38.5	6.0
Boca De Yurumangui	16	31.7	69.4	1100	15.9	14.5
Boca Naya	18	35.6	78.1	3200	41.0	5.6
Río Guandipa	6	11.9	26.0	1600	61.5	3.8
Bocana Hoja Blanca	8	15.8	34.7	900	25.9	9.2
Bocana Del Rosario	5	9.9	21.7	1400	92.2	2.5
Chilvi	5	9.9	21.7	1400	64.5	3.6

Fuente: Gómez & Burgos

Hidrógeno¹¹

Situación en Colombia: El Gobierno Nacional en el año 2020, expidió el Plan Energético Nacional PEN 2020-2050 como un documento de prospectiva del sector energético a largo plazo, visualizándose una transformación a 2050 basada en la descarbonización, descentralización y

¹¹ Investigación desarrollada por los Abogados especialistas e investigadores Daniela Fernanda Gamboa, Angélica María Rivera Mantilla y Hans Atanache Chavarriaga (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

digitalización de la cadena de valor del sector. Esta transformación, demandará la introducción en la matriz energética de las energías renovables no convencionales y específicamente del hidrógeno en el escenario disruptivo con una participación del 11%, conllevando un gran esfuerzo de innovación y de desarrollo tecnológico.

Con el fin de hacer plausible la transformación propuesta a partir de la introducción del hidrógeno en la matriz energética nacional, desde el Ministerio de Minas y Energía – MME -, en el año 2021, se expidió la Hoja de Ruta del Hidrógeno, en la cual además de señalarse las óptimas condiciones climáticas, energéticas y geoespaciales con las que cuenta Colombia, se incluyeron las líneas de trabajo para su despliegue, cuya determinante está orientada a generar habilitación jurídica y regulatoria, crear instrumentos para el desarrollo del mercado, tales como: (i) incentivos de oferta y demanda, (ii) apoyar en el despliegue de infraestructura requerida e impulsar el desarrollo tecnológico, (iii) la innovación e investigación.

Esta Hoja de Ruta proyecta en un horizonte a corto plazo (2020-2026), el desarrollo en los sectores que actualmente consumen hidrógeno como las refinerías, la industria química y la producción de fertilizantes, para luego extender la economía del hidrógeno en el sector de transporte terrestre pesado, posicionándose como el sector que más demande de este nuevo energéticos con un 65% de la demanda total.

Pero ¿Por qué es estratégico el hidrógeno en la transformación del sector energético?; el hidrógeno además de ser una materia prima para el sector industrial es un combustible que se convierte en una opción limpia para descarbonizar los sectores industriales y de transporte pesado, y así, disminuir la generación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero – GEI -en su proceso de combustión final. Adicionalmente, al concebirse como vector energético, se presenta como un facilitador en la integración de las energías renovables no convencionales a la matriz energética al considerarse como almacenador de estas, mitigando la condicional estacional de las energías renovables no convencionales tales como la solar y eólica.

A nivel normativo, en Colombia se ha venido propiciando un ambiente de desarrollo del mercado del hidrógeno a través de los incentivos tributarios, contables y arancelarios para el desarrollo de proyectos de generación de hidrógeno verde, hidrógeno azul e hidrógeno blanco al ser clasificados como fuentes no convencionales de energía, de acuerdo con lo contemplado en la Ley 1715 de 2014 modificada por la Ley 2099 de 2021 y Ley 2294 de 2023. Al mismo tiempo

que se incluye una nueva clasificación del hidrógeno a partir de las emisiones de GEI que genere, lo que permitirá la introducción de nuevas tecnologías en la generación de este elemento, sin embargo, los estándares máximos de emisiones para ser considerado hidrógeno de bajas emisiones aún no han sido definidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Minas y Energía tal como fue señalado en el Decreto 1476 de 2022.

En la misma línea de promoción del mercado del hidrógeno, en las estrategias de financiación, el Gobierno Nacional contempló, además de la cooperación internacional y la destinación de los recursos del Sistema General de Regalías para la participación de las entidades territoriales, la creación del Fondo de Energía No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía – FENOGE –, para financiar planes, programas y proyectos de fuentes no convencionales de energía, principalmente las renovables, en las que se incluyen los proyectos de hidrógeno verde, azul, blanco y de bajas emisiones.

Además, hay que recordar que la incorporación de fuentes no convencionales de energía, especialmente del hidrógeno, conlleva un gran esfuerzo en investigación, desarrollo e innovación, motivo por el cual, a nivel normativo, se contempla fomentar la innovación mediante el establecimiento de programas de ciencias, tecnología e innovación para la formación de capacidades científicas, de investigación y de desarrollo tecnológico en la cadena de valor asociada al hidrógeno, incentivos implementados por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación.

Por otra parte, se resalta como propuesta regulatoria la apertura de Sandbox como una estrategia innovadora que pretende generar regulación técnica y económica del mercado del hidrógeno, sobre todo sobre la calidad, régimen tarifario, requisitos habilitadores y demás aspectos de regulación económica relevantes para el desarrollo de este mercado a partir de la experimentación en ambientes controlados y vigilados, creados por iniciativa de la entidad regulatoria o por iniciativa privada de las empresas participantes, que se realizarán según las reglas del Decreto 1074 de 2015 y que establezca el Ministerio de Minas y Energía.

A pesar de lo anterior, aún se espera mayor dinamismo en la estrategia regulatoria que el Gobierno Nacional plantea para el desarrollo del mercado del hidrógeno, toda vez que sigue pendiente la reglamentación de aspectos tales como: la parametrización del umbral para que el hidrógeno sea considerado de bajas emisiones, la adopción de mecanismos públicos de

certificación de origen, los lineamientos y requisitos para el almacenamiento del hidrógeno en el subsuelo, la armonización regulatoria del hidrógeno cuando sea destinado a la prestación del servicio público domiciliario, los requisitos, procedimientos, condiciones e incentivos del uso del hidrógeno en el sector transporte y su transporte por carreteras, la reglamentación para la promoción y desarrollo de la tecnología de Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono CCUS y la generación de ciclos rápidos de evaluación de licencias, permisos, autorizaciones o concesiones para proyectos relativos de fuentes no convencionales de energía.

Al igual que Colombia, algunos países han elaborado sus propias Hojas de Ruta, implementando diferentes estrategias en términos de producción y usos del hidrógeno, tal es el caso de Australia, Europa, Francia., Alemania, Japón, Países Bajos, Reino Unido, Estados Unidos (EE.UU.), por mencionar algunos.

Ahora, focalizándonos en América Latina, hasta el momento son cuatro (4) los países que han desarrollado hojas de ruta de hidrógeno (Colombia, Chile, Argentina y México). Por su parte Brasil, aún no cuenta con una hoja de ruta, pero adelanta ante el senado 2 proyectos legislativos, PL725 DE 2022 “Disciplina la inserción del hidrógeno como fuente de energía en Brasil, y establece parámetros de incentivo para el uso de hidrógeno sostenible.” y PL 1878 de 2022 “Crea la Política que regula la producción y los usos con fines energéticos del Hidrógeno Verde.”. No obstante, según análisis del Consejo de Hidrógeno, Brasil dominará la exportación del acero verde y el hidrogeno verde como combustible para impulsar la aviación.

- Chile: Desarrolló la Hoja de Ruta, “Estrategia Nacional de Hidrogeno verde – Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones”, en la que destaca la intención de desarrollar una industria competitiva que produzca hidrógeno a partir de electrólisis impulsada por energía renovable de bajo costo para consumo local y la exportación del energético a precio competitivo, 1,5 USD/kl al 2030.

Chile describe en el documento las limitaciones que debe sobrellevar para regular el uso de Hidrogeno. Señala como factores a mejorar, generar las mismas oportunidades de consumo y producción que las energías fósiles, otorgar apoyo e incentivos financieros para que haya participación de industria local y la inmersión de la extranjera, así como potenciar un mercado propicio para exportación con una certificación internacional de origen y huella de carbono.

Como cimientos para el desarrollo del combustible verde, Chile ha publicado: i) guía de apoyo para solicitud de autorización de proyectos especiales de hidrógeno, ii) guía para la aprobación de proyectos piloto de hidrogeno verde en la minería, iii) hidrógeno considerado como sustancia peligrosa de acuerdo con Ley 57, 2021, iv) plan nacional de fomento a la producción de hidrogeno verde en el territorio fiscal de acuerdo con Resolución 998 exenta, 2022, v) blending con gas natural e hidrogeno y vi) incentivos financieros.

- México: Desarrolló la Hoja de Ruta “Hidrógeno verde: El energético para descarbonizar la economía de México.”, su objetivo es producir 230.000 toneladas de hidrógeno al año 2030 lo que reduciría 5`000.000 millones de toneladas CO2 para esa misma fecha. México busca incentivar la inversión nacional y extranjera para el desarrollo de este proyecto, generar 336 empleos con un impacto en el PIB de 4.824 millones de dólares del 2025- 2030.

Como retos a afrontar se identificaron plantear mecanismos para el cumplimiento de las metas de descarbonización, certidumbre regulatoria y crear regulación específica para el hidrógeno, apalancar acuerdos internacionales para exportar el hidrogeno, desarrollar un mercado de CO2, reducirlos costos de producción y transporte, creación de incentivos para potenciar inversión e incrementar la penetración de energías renovables.

Si bien no se ha establecido una normatividad específica, sí hay avances interesantes como i) Ley de Transición energética, ii) Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios, iii) ley de industria eléctrica, en la cual de establecen los certificados de energías limpias (Ley de industria eléctrica, artículo 3, fracción viii.); iv) ley general de cambio climático; v) programa sectorial de energía.

- Argentina: El gobierno argentino, elaboró la Hoja de Ruta “Hacia una estrategia Nacional, Hidrógeno 2030.”, en este se resaltan los potenciales naturales con los que cuenta el país para la generación de energía solar y eólica, para que, a partir de la electrolisis se produzca el hidrógeno verde que espera ser complementado con las 400 mil toneladas de hidrógeno gris que produce el país por año, al que se pretende aplicar tecnología adecuada para la captura, uso y almacenamiento del carbono.

Los desafíos que se identificaron para avanzar en la política del hidrógeno son: la formulación de políticas públicas acertadas con proyecciones nacionales, implementación de tecnologías para el almacenamiento, la conversión y transporte de hidrógeno, así como precios competitivos para la exportación.

En cuanto a la normatividad, Argentina, cuenta con una ley de hidrógeno desde el 2006, la cual “promueve la investigación, el desarrollo, la producción y el uso del hidrógeno como combustible y vector energético, generado mediante el uso de energía primaria y regula el aprovechamiento de su utilización en la matriz energética.”, sin embargo, la hoja de ruta precisa que esta norma, debe ser nuevamente analizada y reevaluar los incentivos propuestos en la misma y proponer otros que atraigan más inversionistas. De la misma manera, se encuentra la Ley 27191 de 2015, Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica y el Decreto 140 de 2007 sobre la prioridad nacional del uso racional y eficiente de energía.

Para el desarrollo tecnológico del hidrógeno, Colombia, tiene una ubicación inmejorable, al contar con dos océanos de los que puede captar el recurso esencial para generar energía por electrolisis. Por esta razón, para el año 2022, nuestro país, se posicionó en América Latina como el segundo lugar que ha venido avanzando hacia el camino del hidrógeno verde.

Captura y almacenamiento de carbono (CCS) ¹². El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. A nivel mundial, las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera han alcanzado niveles preocupantes, contribuyendo al calentamiento global y sus consecuencias devastadoras.

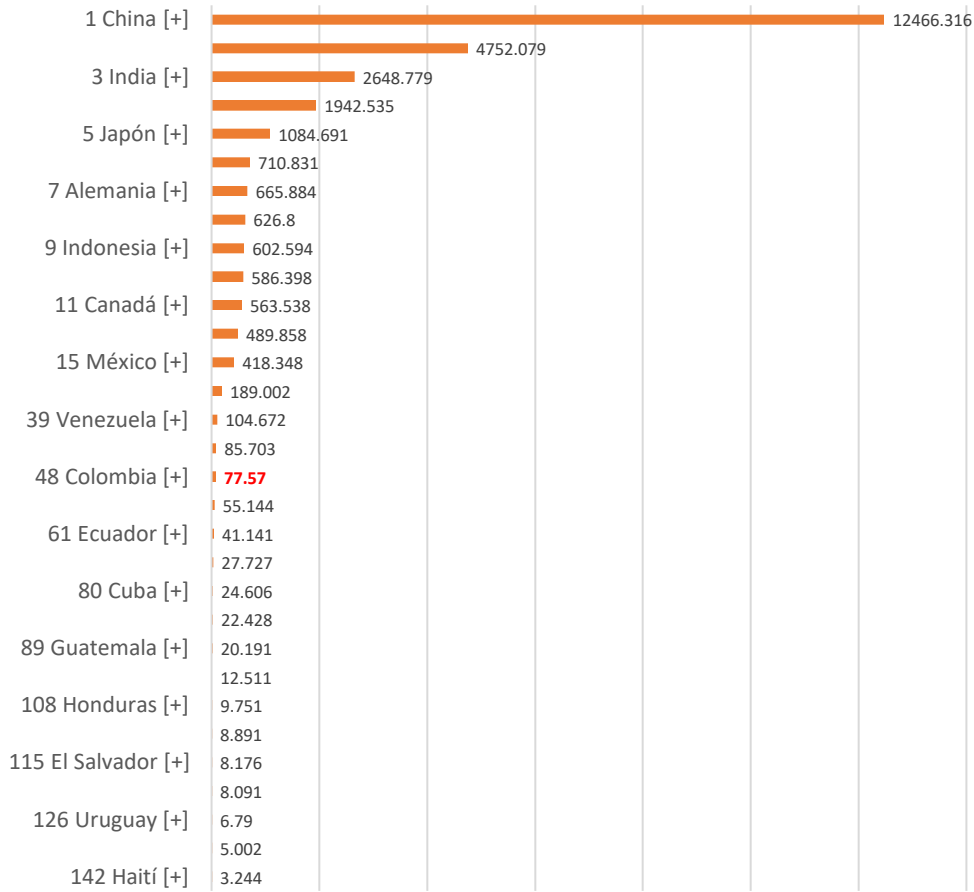
Durante los últimos 20 años, las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) se han acentuado constantemente. A principios de siglo, las emisiones globales habían alcanzado 23.500 millones de toneladas métricas, pero en 2019 eran de 37.000 millones. En 2020 hubo una reducción de unos 2.000 millones de toneladas métricas, debido a la recesión económica

¹² Investigación desarrollada por los Abogados especialistas e investigadores Daniela Fernanda Gamboa, Angélica María Rivera Mantilla, Hans Atanache Chavarriaga (Facultad Derecho Minero Energético, UEC)

mundial. Pero en 2023 continuó el aumento de las emisiones que consistió en 2.500 millones de toneladas con respecto a 2020.

El siguiente gráfico muestra la situación en algunos países. Los diez primeros representan el 75% de la contaminación mundial por CO2.

Figura 13. Emisiones de CO2 en algunos países



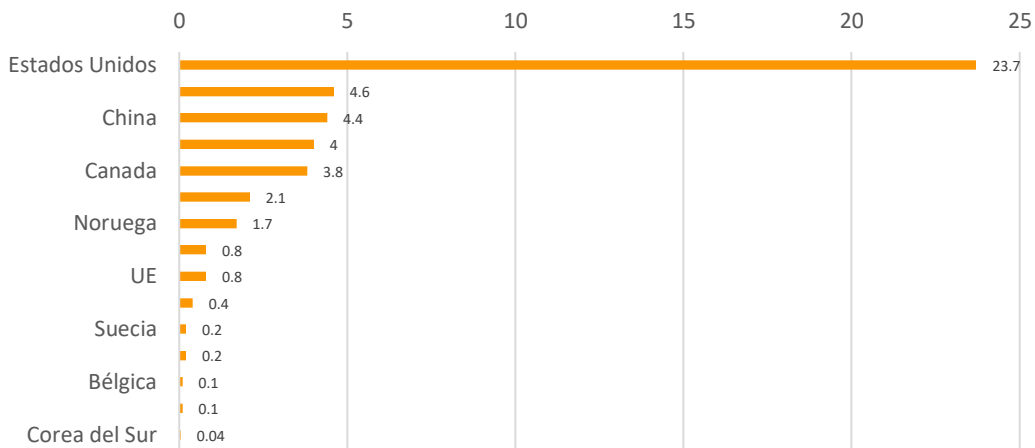
Fuente: Expansión

Colombia ocupa el puesto 48 produciendo 77, 57 toneladas métricas, el 80% de los proviene de automotores, el restante por industrias y residencias. En este contexto, la captura y almacenamiento de carbono (CCS - Carbon capture and storage) emerge como una tecnología clave para mitigar las emisiones de CO₂.

Aunque muchos expertos creen que la captura y almacenamiento del carbono será una herramienta clave para limitar las emisiones y cumplir los objetivos climáticos, el sector todavía está en su infancia. La cantidad de CO₂ capturada por las instalaciones de los países destacados representa actualmente sólo el 0,12 por ciento de las emisiones globales anuales.

La tabla siguiente muestra la capacidad de captura y almacenamiento mundial en los países líderes al día de hoy

Figura 14. Capacidad de las instalaciones operativas de captura y almacenamiento de carbono a partir de 2022, por país (en millones de toneladas métricas por año)



Fuente: Statista

La captura y almacenamiento de carbono es una tecnología crucial llamada a permitir la reducción de emisiones de CO₂ en sectores industriales y la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles. En Colombia, donde las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado en los últimos años, la implementación efectiva de la captura y almacenamiento de carbono es esencial para cumplir con los compromisos internacionales de reducción de emisiones.

La captura y almacenamiento de carbono implica capturar dióxido de carbono (CO₂) en fuentes de emisión, como centrales eléctricas o instalaciones industriales, y almacenarlo a gran profundidad. En 2022, la capacidad global de CO₂ de las instalaciones de captura y

almacenamiento de carbono en desarrollo aumentó un 44 por ciento a 242 millones de toneladas métricas por año (Mtpa), y las instalaciones operativas capturaron alrededor de 42 Mtpa. Estos son los sectores donde se ha desarrollado la actividad y el porcentaje de captura y almacenamiento logrados.

Tabla 3. Captura y almacenamiento de carbono por sectores

Sectores	Porcentaje
Procesamiento de gas natural	0,38
Energía	0,16
Gas natural licuado	0,13
Productos químicos y fertilizantes.	0,07
Gas natural sintético	0,06
Refinación de petróleo	0,05
Campos de petróleo y gas	0,03
Petroquímicos	0,03
Mejora de arenas bituminosas	0,03
Biorrefinería	0,03
Hierro y acero	0,02
Perdida de energía	0,01

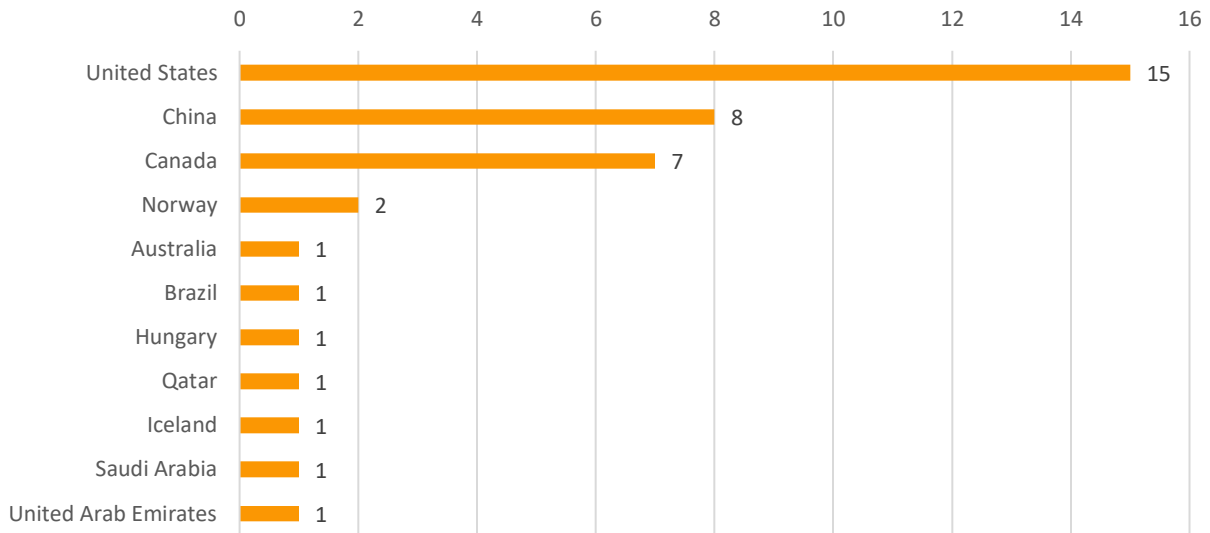
Fuente: Statista

La mayor parte del CO₂ capturado por las instalaciones de captura y almacenamiento de carbono activas se encuentra en plantas de procesamiento de gas natural, pero se espera que la mayor parte de la capacidad de captura se utilice para el sector energético y la fabricación de amoníaco e hidrógeno para 2030. También se espera que el destino del CO₂ capturado cambie en los próximos años. años desde la recuperación mejorada de petróleo hasta el almacenamiento geológico dedicado.

El gráfico siguiente muestra los proyectos operativos de Captura y Almacenamiento de Carbono. Los países que van a la cabeza en esta tecnología son Estados Unidos, China y Canadá. 15 de las 39 instalaciones de captura y almacenamiento de carbono operativas del planeta están situadas en los Estados Unidos. Este país es el líder mundial en el desarrollo y

despliegue de captura y almacenamiento de carbono y posee 104 proyectos en desarrollo que equivalen al mayor número de actividades al respecto mundialmente.

Figura 15. Instalaciones operativas de Captura y Almacenamiento de Carbono para 2023, por país principal



Fuente: Statista

Aunque Colombia ha avanzado en la adopción de prácticas sostenibles y ha mostrado interés en la captura y almacenamiento de carbono, la implementación a gran escala aún enfrenta desafíos. La dependencia histórica de los combustibles fósiles y la expansión de sectores como la minería y la energía son factores que contribuyen significativamente a las emisiones de CO₂.

Varios países latinoamericanos han comenzado a explorar la captura y almacenamiento de carbono como parte de sus estrategias climáticas. Sin embargo, la falta de inversión y la necesidad de capacidades técnicas son desafíos comunes en la región. La colaboración entre naciones latinoamericanas puede facilitar la adopción de tecnologías de CAC y compartir mejores prácticas.

No se puede subestimar el potencial de la captura y almacenamiento de carbono. De hecho, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) enfatiza que la tecnología será clave para alcanzar emisiones netas cero para mediados de siglo. Sin embargo,

a pesar de su importancia, los niveles de implementación de la captura y almacenamiento de carbono han sido lentos.

En particular en Colombia y América Latina este tipo de tecnología son esenciales para abordar el cambio climático a nivel mundial. Se necesita una mayor inversión, tanto nacional como internacional, para desarrollar capacidades y promover su implementación efectiva. La cooperación regional y global será fundamental para superar los desafíos y garantizar un futuro sostenible para las generaciones venideras. La transición hacia una economía baja en carbono no solo es una responsabilidad, sino una oportunidad para construir un mundo más resiliente y equitativo.

2.4 Sistema regulatorio y hojas de ruta para la Transición Energética en Colombia

2.4.1 Normatividad

Entre los avances clave en la ejecución de la visión de largo plazo del país en materia de mitigación de emisiones y transición energética, se ha impulsado desde el ámbito normativo el uso de fuentes no convencionales de energía, la eficiencia energética, la gestión y seguimiento a las emisiones de gases de efecto invernadero, la movilidad eléctrica, economía circular, entre otros, como se presenta a continuación:

- Ley 697 de 2001: Promueve el uso racional y eficiente de la energía y el desarrollo de fuentes no convencionales de energía;
- Decreto 3683 de 2003: Reglamenta la Ley 697 de 2001, estableciendo lineamientos para programas de uso eficiente y racional de energía;
- Ley 1715 de 2014: Regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, fomentando su desarrollo y utilización;
- Instrumentos creados por Ley 1931 de cambio climático, promulgada en 2018, incluyendo el Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión;
- Resolución 1447 de 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Sistema de monitoreo, reporte y verificación de las acciones de mitigación a nivel nacional;

- CONPES 3934 de 2018: Crecimiento Verde;
- Estrategia Nacional de Economía Circular – ENEC (2019);
- Ley 1964 de 2019: Movilidad Eléctrica;
- Ley 2099 de 2021: Conocida como la Ley de Transición Energética, moderniza la legislación vigente para dinamizar el mercado energético y promover fuentes no convencionales de energía.
- Documento CONPES de Transición Energética (2022): Política pública que establece lineamientos y acciones para que el país mantenga su seguridad y confiabilidad energética, contribuyendo a la meta de reducción del 51% de emisiones de gases de efecto invernadero para 2030.
- Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa (2023): Documento estratégico del Ministerio de Minas y Energía que establece los lineamientos para una transición energética inclusiva y sostenible (en construcción).
- Decreto 2235 de 2023: Establece lineamientos para la evaluación, exploración y explotación del hidrógeno blanco en Colombia, promoviendo su desarrollo como fuente no convencional de energía renovable.
- Decreto 2236 de 2023: Define y regula las Comunidades Energéticas, permitiendo que grupos organizados de usuarios generen, comercialicen y utilicen eficientemente la energía a través de fuentes no convencionales de energía renovable.
- Ley 2294 de 2023: Incluida en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, promueve la Transición Energética Justa en Colombia, estableciendo disposiciones para la constitución y operación de las Comunidades Energéticas.
- Decreto 1403 de 2024: Facilita la autogeneración de energía eléctrica, eliminando trámites para que los ciudadanos puedan producir y consumir su propia energía, impulsando la transición hacia fuentes limpias.

2.4.2 Compromisos y metas de Colombia

En el marco de la transición energética y la descarbonización, Colombia ha adoptado una serie de estrategias, políticas y hojas de ruta que establecen objetivos específicos en materia de cambio climático, energías renovables, eficiencia energética, reducción de emisiones y modernización del sistema eléctrico. A continuación, se presentan algunos de los compromisos y metas clave definidos en los principales documentos estratégicos del país que fueron empleados como referencia para el presente estudio:

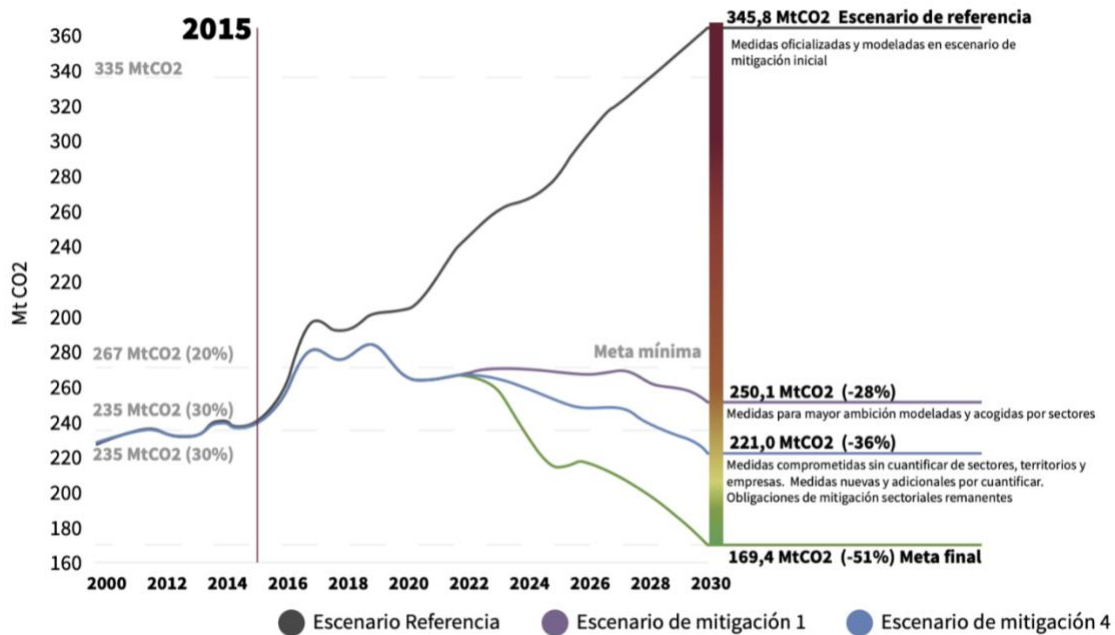
Contribución Nacionalmente Determinada (NDC). La NDC de Colombia cuenta con un componente asociado a adaptación al cambio climático y otro relacionado con la mitigación de GEI. En cuanto al componente de mitigación de GEI, la meta actualizada de Colombia parte de una visión de largo plazo que se establece por la aspiración hacia la carbono neutralidad manifestada por el país en la Cumbre de Acción Climática de Naciones Unidas en Septiembre de 2019, y que se reflejará en la Estrategia de Largo Plazo E2050, una visión de mediano plazo a 2030 que se establece a través de la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono Adaptada y Resiliente y la Estrategia Integral de Control de la Deforestación y Gestión de los Bosques, y una visión de corto plazo a través del Plan Nacional de Desarrollo.

Entre las prioridades para la mitigación y adaptación al cambio climático en el marco de la NDC, Colombia estableció los siguientes compromisos:

- Alcanzar una reducción del 51% de las emisiones de GEI para 2030, con medidas específicas en energía, transporte, residuos e industria.
- A 2025, contar con una metodología de análisis de riesgos climáticos actualizada, junto con una estrategia de actualización de manera periódica a nivel nacional y empresarial.
- Contar con un proyecto de adaptación basado en ecosistemas para el sector eléctrico a 2025.
- Implementación de estrategias, acciones y proyectos de adaptación al cambio climático, en mínimo el 10% de pequeñas, medianas y grandes empresas de los sectores priorizados a 2025.

La meta de mitigación de Colombia, en términos de las emisiones absolutas máximas del país en el año 2030 (meta absoluta de emisiones para un solo año), se estableció a partir de la proyección y análisis de su escenario de referencia BAU (Business As Usual, el cual considera el crecimiento tendencial de las emisiones en ausencia de implementación de acciones de mitigación de GEI) y del análisis y modelación de escenarios de políticas y medidas de reducción de emisiones de GEI para alcanzar la meta, como se describe a continuación:

Figura 16. Meta de mitigación en NDC actualizada 2020



Fuente: INGEI 2021 – BUR 3

En la Tercera Comunicación Determinada Nacional de Colombia, también se plasman las diferentes políticas y estrategias que ha desarrollado el país en materia de cambio climático, siendo estas: Proyecto de Ley Nacional de Cambio Climático, Política Nacional de Cambio Climático (PNCC), Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono, Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), Estrategia Nacional REDD+, Estrategia de Protección Financiera ante Eventos de Cambio Climático, Planes Integrales de Gestión de Cambio Climático Territoriales, y Planes Integrales de Gestión de Cambio Climático Sectoriales.

Estrategia Climática de Largo Plazo E2050. La Estrategia E2050 define la hoja de ruta para que Colombia alcance la carbono neutralidad en 2050, en línea con el Acuerdo de París.

Entre sus compromisos en cuanto a mitigación destacan:

- Reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI): Reducción del 51% de emisiones netas de GEI al 2030 frente al escenario de referencia (BAU), con unas emisiones máximas permitidas de 169.44 millones de toneladas de CO₂eq para 2030.
- Reducción de Carbono Negro: Disminución del 40% de las emisiones de carbono negro al 2030.
- Deforestación: (i) Reducción de la tasa de deforestación a 50,000 hectáreas/año en 2030, (ii) Lograr la deforestación neta cero en bosques naturales para 2030.
- Movilidad Eléctrica: Incorporar 600,000 vehículos eléctricos en circulación para 2030, incluyendo transporte público y privado.
- Energías Renovables y Eficiencia Energética: (i) Incremento significativo de la participación de fuentes renovables no convencionales en la matriz energética, y (ii) Mejora de la eficiencia energética en sectores clave como el transporte, la industria y los edificios.

Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia. El hidrógeno verde se posiciona como una tecnología clave en la transición energética del país. Sus metas principales incluyen:

- Instalación de 1-3 GW de capacidad de electrólisis para 2030.
- Reducción de 2 millones de toneladas de CO₂ anuales en el corto plazo mediante proyectos piloto y escalamiento de la industria del hidrógeno.
- Expansión a 10-20 GW de capacidad instalada para 2050, con aplicaciones en transporte pesado, industria y exportación.

Plan Energético Nacional 2022-2052. Este documento establece la hoja de ruta para el desarrollo del sector energético en Colombia en un horizonte de 30 años, con el objetivo de garantizar un suministro confiable, sostenible y competitivo, y plantea los siguientes pilares sobre los cuales se deben orientar y sustentar los esfuerzos de política pública: (i) seguridad y

confiabilidad del abastecimiento, (ii) adaptación y mitigación del cambio climático, (iii) competitividad y desarrollo económico, (iv) conocimiento e innovación.

Entre los principales objetivos y visión al 2052 planteados en el PEN se encuentran:

- **Diversificación de la Matriz Energética:** Se proyecta que las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), como solar y eólica, incrementen su participación en la producción primaria de energía pasando del 1,4% (línea base 2021) al 7 - 30% al 2052, dependiendo del escenario analizado.
- **Generación Distribuida y Comunidades Energéticas:** (i) Promoción de la generación distribuida y autogeneración con tecnologías renovables para áreas urbanas y rurales, e (ii) Impulso a comunidades energéticas que integren fuentes renovables, medición inteligente y digitalización.
- **Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones:** Se propone mejorar la eficiencia energética en todos los sectores consumidores como complemento al crecimiento de las energías renovables, con el objetivo de alcanzar reducciones significativas en emisiones de GEI a través de la sustitución de combustibles fósiles por renovables.
- **Hidrógeno Verde:** Colombia busca posicionarse como un líder regional en hidrógeno verde, complementando la generación renovable con tecnologías que permitan el almacenamiento y exportación.
- **Incentivos y Políticas para Energías Renovables:** El PEN contempla el fortalecimiento de incentivos económicos y regulatorios para acelerar la adopción de FNCE.

Documento CONPES 4075 - Política de Transición Energética. Este documento define las estrategias y lineamientos de política pública para garantizar una transición energética ordenada, segura e inclusiva. Sus principales estrategias incluyen:

- Diversificación de la matriz energética mediante la integración de energías renovables, almacenamiento y digitalización del sistema eléctrico.
- Promoción de una transición energética justa, garantizando acceso equitativo a la energía y generación de empleo en sectores sostenibles.

- Implementación de mecanismos de regulación e incentivos financieros para atraer inversiones en tecnologías emergentes como la captura directa de carbono (DAC) y el blockchain aplicado a la energía.

Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. En el Plan Nacional de Desarrollo (PND) se plantean cinco pilares y catalizadores (Figura 17) para lograr una transformación que propicie el desarrollo sostenible y la competitividad del país, en donde uno de ellos es la transformación energética de manera progresiva que “reduzca la dependencia del modelo extractivista y democratice el uso de recursos energéticos locales como las energías limpias y la generación eléctrica”.

Figura 17. Catalizadores transformación PND



Fuente: PND

En este plan, se establecen diversas metas para acelerar la transición energética, entre las cuales se encuentran:

- Ampliar la capacidad en operación comercial de generación eléctrica a partir de FNCER, pasando de 297 MW (línea base) a 2.297 MW como meta del cuatrienio.

- Promover la electrificación del transporte público y privado, con incentivos para la adopción de vehículos eléctricos.
- Implementar políticas de eficiencia energética en sectores industriales y residenciales.
- Garantizar la seguridad energética del país mediante la modernización del sistema eléctrico y la diversificación de fuentes de generación
- Destinar los excedentes generados por la explotación de hidrocarburos a impulsar una transición hacia una economía verde y sostenible.
- Promover la integración energética regional con visión de largo plazo, para el intercambio de recursos y excedentes energéticos, así como estrategias de producción de nuevos portadores energéticos como el hidrógeno verde, teniendo en cuenta: (i) armonización regulatoria entre países, (ii) diversificación de la matriz energética, basada principalmente en fuentes de energía renovables, (iii) fortalecimiento de capacidades tecnológicas y conocimiento de punta, y (iv) resiliencia y seguridad energética regional Latinoamérica.
- Impulsar la incorporación de nuevas fuentes de generación de energía eléctrica a partir de FNCER, ajustando e implementando las hojas de ruta del hidrógeno y de la energía eólica costa afuera.
- Implementar mecanismos que permitan avanzar en el licenciamiento ambiental y consulta con comunidades indígenas.
- Priorizar el uso de recursos energéticos locales, garantizando a su vez la estabilidad y el respaldo del sistema eléctrico a través de la implementación de sistemas de almacenamiento y el uso de fuentes renovables para la sustitución progresiva y segura de las plantas termoeléctricas.
- Desarrollar la infraestructura necesaria para llevar los energéticos desde la fuente hasta la demanda.

Hoja de Ruta de Energía Eólica Costa Afuera (2023). Dado el alto potencial de Colombia en energía eólica marina, este documento establece los siguientes objetivos:

- Desarrollar entre 200 MW y 1 GW de capacidad instalada para 2030.

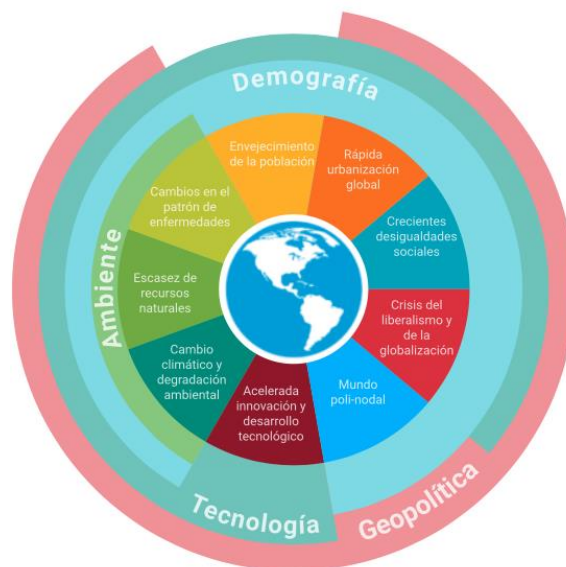
- Establecer mecanismos de inversión para alcanzar hasta 9 GW de capacidad instalada en 2050, posicionando a Colombia como líder en la región.
- Generar marcos regulatorios para facilitar la financiación y desarrollo de proyectos eólicos costa afuera.

2.5 Análisis de megatendencias, tendencias y señales débiles

2.5.1 Megatendencias

Dentro del estudio estratégico prospectivo, es relevante realizar un análisis de megatendencias, las cuales son eventos que se originaron en el pasado y seguirán materializándose en corto, mediano y largo plazo. Esta herramienta permite identificar posibles escenarios futuros y diseñar estrategias que respondan a estos cambios, evaluando las oportunidades y los riesgos a largo plazo y priorizando áreas de innovación y desarrollo en sectores clave como la energía. En este orden de ideas y teniendo en cuenta las megatendencias identificadas por CEPLAN. En la Tabla 4 se presenta el impacto y la relación entre las megatendencias para la transición energética en Colombia.

Figura 18. Megatendencias



Fuente: (CEPLAN, 2023).

Tabla 4. Análisis de megatendencias – Transición energética en Colombia

Megatendencia	Definición de la megatendencias	Impacto
Envejecimiento poblacional	Proyecta un aumento significativo de personas mayores de 65 años, planteando retos en expectativa de vida, distribución demográfica y sistemas de pensiones.	Positivo: Requiere adaptar el sistema para atender las necesidades de una población envejecida, como soluciones energéticas accesibles y eficientes. Se puede predecir hábitos de consumo.
Urbanización acelerada	Incremento de la población urbana al 68.4 % para 2050, impulsando desafíos como infraestructura, desplazamiento forzado y resiliencia urbana.	Negativo: Aumento de la demanda energética en áreas urbanas, creando la necesidad de implementar redes inteligentes, transporte limpio y gestión de la demanda.
Mundo polinodal	Rivalidades entre grandes potencias, como China y EE.UU., que debilitan el multilateralismo y exigen nuevas formas de gobernanza global.	Negativo: Reconfiguración de alianzas y acceso a tecnologías clave para energías renovables.
Desigualdades sociales persistentes	Persistencia de brechas económicas, de género y de acceso a recursos, agravadas por tensiones sociales y conflictos.	Negativo: Riesgo de exclusión energética en zonas vulnerables, requiriendo políticas de equidad energética y descentralización de la energía.
Crisis en el liberalismo y la globalización	Reconfiguración del orden global con el ascenso del populismo y la regionalización, afectando la cooperación internacional.	Negativo: Inestabilidad en acuerdos internacionales que puede retrasar metas climáticas y energéticas.
Cambios en patrones de enfermedades y sistemas de salud	Incremento de enfermedades no transmisibles y desafíos para sistemas sanitarios debido a pandemias y desigualdades.	Negativo: Mayor énfasis en infraestructuras resilientes para garantizar suministro de energía en emergencias sanitarias. Garantizar almacenamiento de energía.

Megatendencia	Definición de la megatencias	Impacto
Escasez de recursos naturales	Creciente presión sobre recursos críticos como agua y tierras agrícolas, con desafíos para garantizar sostenibilidad.	Negativo: Necesidad de optimizar el uso de materiales críticos para tecnologías limpias con afectación mínima sobre los recursos.
Cambio climático y degradación ambiental	Impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero y pérdida de biodiversidad, exigiendo acciones urgentes.	Positivo: Urgencia en acelerar la transición hacia energías renovables y mitigar los impactos ambientales.
Acelerada innovación y desarrollo tecnológico	Transformación de la sociedad por avances en tecnologías como inteligencia artificial, biotecnología y nanotecnología.	Positivo: Adopción de tecnologías emergentes como hidrógeno verde, sistemas de generación renovables, blockchain y redes digitales para avanzar en la transición energética.

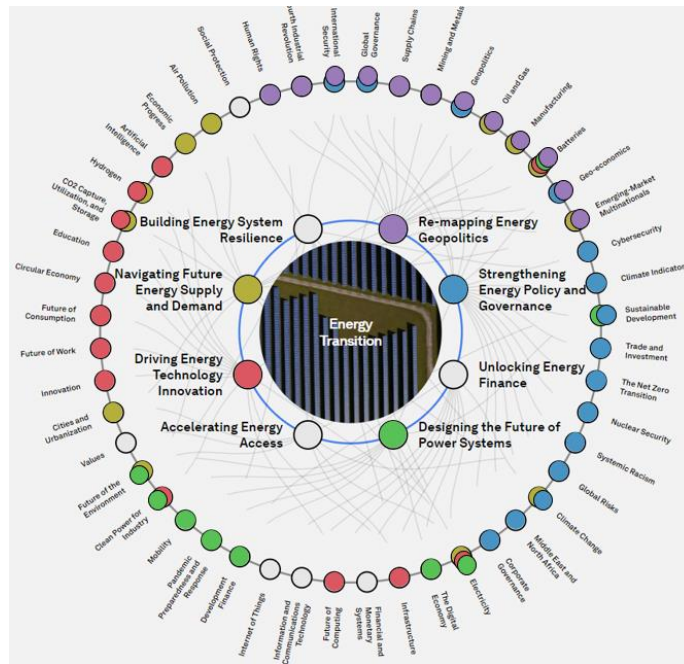
Fuente: (CEPLAN, 2023)

Este análisis del impacto de las megatendencias en la transición energética en Colombia aporta un marco de referencia para iniciar el estudio prospectivo ya que incluye puntos relevantes como: i. anticipación a los cambios estructurales globales y nacionales que pueden influir en el diseño y la implementación de políticas energéticas, ii. desarrollo de tecnologías específicas y mejora en la infraestructura energética en zonas urbanas y rurales, y iii. reducción de brechas de acceso a energía en poblaciones vulnerables.

2.5.2 Tendencias y señales débiles

Con base en las megatendencias identificadas, se realizó una búsqueda en el World Economic Forum de las tendencias y de las señales débiles definidas como tendencias con un desarrollo incipiente.

Figura 19. Tendencias relacionadas con transición energética



Fuente: (WEF, 2024)

Tabla 5. Análisis de tendencias / señales débiles – Transición energética en Colombia

Tendencia	Megatendencias asociadas	Elementos clave
Resiliencia del Sistema Energético	Cambio climático y degradación ambiental, Escasez de recursos naturales	Finanzas públicas, Seguridad internacional, medio ambiente y seguridad de los recursos naturales, Economía digital y sociedad, Infraestructura, Electricidad, Cambio climático, Financiamiento energético.
Futuro de la Oferta y Demanda Energética	Urbanización acelerada, Escasez de recursos	CCUS, H2, Contaminación del aire, Progreso económico, Petróleo & gas, El futuro de la producción, Multinacionales emergentes, Baterías, Cambio climático, Electricidad, Medio ambiente y seguridad de los recursos naturales, Ciudades & urbanización.
Impulso de la Innovación Tecnológica en Energía	Acelerada innovación y desarrollo	H2, Educación & habilidades, CCUS, IA & robótica, empleo & habilidades, economía circular, Innovación, Futuro del consumo, Energía limpia para la industria, Infraestructura, Electricidad, Baterías
Aceleración del Acceso a la Energía	Desigualdades sociales persistentes, Urbanización acelerada	Medio ambiente y seguridad del medio ambiente, Infraestructura, Electricidad, Riesgo & resiliencia, Derechos humanos, Cadena de suministro & transporte, Ciudades & urbanización.
Diseño del Futuro de los Sistemas de Energía	Acelerada innovación y desarrollo tecnológico, Cambio climático y degradación ambiental	Baterías, Desarrollo sostenible, Electricidad, Financiación para el desarrollo, Economía digital, Medio ambiente y seguridad del medio ambiente, El

Tendencia	Megatendencias asociadas	Elementos clave
Redefinición de la Geopolítica Energética	Mundo polinodal, Crisis del liberalismo y la globalización	futuro de la movilidad, Energía limpia para la industria. Seguridad internacional, Geopolítica, Cadena de suministro & transporte, Petróleo & gas, Futuro de la producción, Multinacionales emergentes, Minería & metales, Derechos humanos, 4ta revolución industrial, Gobernanza global, Geoeconomía, Baterías.
Fortalecimiento de la Política y Gobernanza Energética	Mundo polinodal, Crisis del liberalismo y la globalización	Seguridad internacional, Geopolítica, Gobernanza global, Geoeconomía, Riesgo & resiliencia, Comercio e inversión extranjera, Seguridad cibernética, Nuevos acuerdos ecológicos, Seguridad nuclear, Gobernanza corporativa, Indicadores climáticos, Desarrollo sostenible, Cambio climático.
Liberación de la Financiación Energética	Crisis del liberalismo y la globalización, Acelerada innovación tecnológica	Cambio climático, Electricidad, Financiación para el desarrollo, Comunicaciones digitales, Infraestructura, Economía digital, Internet de las cosas, Sistema financiero.

Fuente: World Economic Forum

A partir de las tendencias y sus elementos clave reconocidos en el mapa del WEF, se puede identificar señales débiles que son elementos que, aunque no tienen una presencia significativa en la discusión global pueden convertirse en factores disruptivos en el futuro.

- Hidrógeno verde: Energía con potencial, pero con barreras económicas, tecnológicas y de infraestructura para su adopción masiva.
- Economía circular en energía: La integración de la economía circular en la producción y uso de energía es un concepto emergente que no está completamente explorado en políticas energéticas globales pero que podría reducir significativamente los residuos y optimizar el uso de recursos en sistemas energéticos.
- Justicia energética: Es un tema creciente pero todavía no ocupa un lugar central en la formulación de políticas públicas en muchos países.
- Ciberseguridad en la infraestructura energética: A medida que los sistemas energéticos se digitalizan, la ciberseguridad es un riesgo emergente que no siempre está integrado en los planes de transición energética.
- Blockchain: Aunque tiene aplicaciones potenciales en redes descentralizadas y mercados de energía, su adopción aún es limitada y experimental.
- Futuro del consumo: Los cambios en los valores sociales y patrones de consumo es un factor clave en la transición.
- Inversión en mercados emergentes: Las inversiones en mercados emergentes aún no han alcanzado niveles necesarios para impulsar una transición energética global inclusiva lo que implica que la movilización de financiamiento hacia estos mercados puede desbloquear el potencial de energías renovables en regiones clave.

2.6 Puntos críticos identificados

Con base en lo anterior, es posible identificar factores que impulsan el proceso de la transición energética en Colombia, e igualmente aquellos que obstaculizan su progreso. Este listado de algunos de los factores impulsores y retardadores que se denominan “puntos críticos”, los cuales son el insumo para seleccionar los “factores de cambio” que se desarrollan en el Capítulo 4 del presente documento.

2.6.1 Factores impulsores

- *Presión internacional.* La creciente conciencia global sobre el cambio climático ha llevado a un aumento en la presión internacional para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adoptar fuentes de energía renovable.
- *Recursos naturales abundantes.* Colombia cuenta con una gran cantidad de recursos naturales, como radiación solar, viento y recursos hídricos, que pueden aprovecharse para la generación de energía renovable.
- *Políticas energéticas favorables.* Creciente desarrollo de políticas energéticas claras y favorables que regulen implementación de FNCER, tecnologías y estrategias reduzcan la incertidumbre frente a la transición energética en el país.
- *Incentivos gubernamentales.* Colombia ha establecido incentivos tributarios y de financiación a proyectos de FNCER que favorezcan la transición energética, como deducción sobre la renta, exclusión del IVA, exención de aranceles, depreciación acelerada de activos, en la Ley 1715 del 2014 y 2099 del 2021, PND 2018 2022, financiamiento como el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge), entre otros.
- *Avances tecnológicos.* El desarrollo y la mejora continua evidenciados a nivel global en las tecnologías de energías renovables, como la solar y eólica, ha favorecido su viabilidad técnica y económica, incluso en el contexto colombiano. Este punto crítico está desarrollado en el estudio de Vigilancia Tecnológica.
- *Concientización ciudadana.* La conciencia ambiental de la población puede presionar a las autoridades y empresas para que adopten fuentes de energía más limpias y sostenibles.

- *Compromiso del sector empresarial.* La participación activa de empresas en la adopción de prácticas sostenibles y la inversión en proyectos de energía limpia contribuyen significativamente a la transición.

2.6.2 Factores retardadores

- *Dependencia de los combustibles fósiles.* La infraestructura existente y la dependencia histórica de los combustibles fósiles pueden dificultar la transición hacia fuentes de energía más limpias.
- *Insuficiencia de infraestructura.* Para lograr un abastecimiento seguro, eficiente y confiable de energía en el sector, es clave garantizar una mayor cobertura de la infraestructura, tanto eléctrica como tecnológica para la digitalización, fiscalización e información, requiriendo inversiones significativas para su desarrollo.
- *Costos iniciales elevados.* Aunque las energías renovables tienden a ser más rentables a largo plazo, los altos costos iniciales de instalación pueden desalentar las inversiones, especialmente en el corto plazo.
- *Influencia de la industria tradicional.* Los intereses económicos de la industria de los combustibles fósiles pueden influir significativamente en la implementación de cambios a nivel país para la transición energética, ya sea mediante la promoción de regulaciones e inversiones económicas que favorezcan la reconversión y/o implementación de tecnologías menos contaminantes, o la oposición a políticas que desincentiven la producción y uso de combustibles fósiles en pro de la descarbonización y transición energética, afectando la rentabilidad de las operaciones.
- *Desafíos geográficos.* En regiones remotas de Colombia, las condiciones geográficas representan desafíos adicionales para la implementación de sistemas de generación de energía, como altos costos de transporte, instalación, operación y mantenimiento, etc.
- *Posición de las comunidades.* Para el desarrollo de proyectos renovables, es clave comprender el contexto del territorio y la posición de las comunidades en el mismo, debido las altas exigencias que se presentan generalmente para permitir la implementación de nuevos proyectos en el área.

Capítulo 3. Vigilancia Tecnológica

La inteligencia tecnológica es un proceso organizado para captar información de las diferentes bases de datos avaladas por pares, sobre ciencia y tecnología, con el fin de seleccionarla, analizarla y convertirla mediante herramientas en conocimiento con el fin de identificar disrupciones que nos permita anticiparnos a los cambios a los que se enfrenta la transición energética.

En el presente capítulo se presenta una revisión de las tecnologías en energía presentadas por el Instituto Future Today (IFT), así como un análisis cuantitativo que permita contar con un panorama respecto a las principales investigaciones, y patentométrico para conocer los principales desarrollos tecnológicos en el mundo.

Teniendo en cuenta el contexto tecnológico de cambio climático y energía, se identificaron tecnologías como: solar concentrada, eólica flotante en altamar, geotermia supercrítica, hidrogeno natural o blanco, redes inteligentes, entre otros. A partir de la cuantimetría, fue posible identificar que entre los principales resultados asociados a transición energética se encuentran: energías renovables, crecimiento económico, emisiones de CO₂, optimización, rendimiento, gestión de la energía, políticas, respuesta a la demanda, recursos distribuidos de energía, microrredes, sistemas híbridos, entre otros, y en cuanto a tecnologías se encuentran: almacenamiento de energía, energía solar, biomasa, hidrógeno, eólica, geotermia, termofotovoltaica, entre otros. En cuanto a los resultados de patentes, los códigos más referenciados y que, por tanto, muestran un mayor desarrollo y resultados tangibles son: H011-31/052: sistemas solares híbridos, G06q-050/06: tecnologías de la información y comunicación para el procesamiento de datos, H02j-003/38: circuitos eléctricos para distribución de energía eléctrica asociados a sistemas solares o eólicos, H011-031/0687: dispositivos semiconductores, F03d-013/25: instalación en alta mar de motores eólicos, F03d-003/06: dispositivos semiconductores, F04d-025/08: refrigeración de sistemas electrónicos, F03d-005/00: motores eólicos, entre otros.

3.1 Informe Future Today 2024: Energía

Este reporte aborda tendencias tecnológicas y científicas emergentes que están transformando la producción, el consumo y la gestión de la energía, con un enfoque particular en los desafíos climáticos y la transición energética. A continuación, se describen las nuevas tecnologías para energías renovables no convencionales y como parte del análisis de inteligencia competitiva se describen las universidades y empresas que están trabajando en desarrollo de tecnologías para la transición.

3.1.1 Energía solar

Energía solar concentrada. La energía solar concentrada (CSP) utiliza espejos parabólicos o «helióstatos» para enfocar la luz solar y generar temperaturas extremadamente altas. Al generar energía térmica, ésta puede transferirse y almacenarse a largo plazo en depósitos de sales fundidas. Debido a la abundancia de los elementos necesarios, el almacenamiento térmico a gran escala sería relativamente barato si se compara con los elementos de tierras raras necesarios para las baterías eléctricas, como el litio y el cobalto. Por este motivo, la energía solar concentrada es una alternativa económica a la energía solar fotovoltaica para uso nocturno.

Sistemas solares híbridos. Las empresas están construyendo nuevas instalaciones solares pensando en beneficios adicionales más allá de la generación de energía eléctrica. Cuando se instalan en tándem con aerogeneradores, los paneles solares se colocan para aprovechar el efecto Venturi, creando túneles de viento. Estas configuraciones aumentan el flujo de aire y la potencia de los aerogeneradores hasta un 60%. En California, un programa piloto llamado Proyecto Nexus está colocando paneles solares sobre los canales de riego de San Francisco. Los investigadores calculan que la instalación de paneles solares similares sobre los 6.000 km de canales abiertos, generarían 13 gigavatios de energía y ahorrarían 63.000 millones de galones de agua al año anualmente en una región que ha sufrido sequía de la última década. Las cubiertas solares enfrían la temperatura del agua, detienen la evaporación e impiden el crecimiento de plantas acuáticas.

Energía gestionable. permite gestionar la energía en función de las fluctuaciones de la demanda, ajustando los ángulos de cada panel para modificar su generación total de energía y adaptarse mejor a las necesidades de la red. En las grandes huertas solares, este sistema de despacho puede llegar a ajustar independientemente subsecciones de paneles o incluso paneles individuales, para compensar otros temporalmente debido a la nubosidad o a problemas de funcionamiento, garantizando así una producción eficiente, dinámica y reactiva.

Celdas de perovskita. La perovskita es un compuesto cristalino que puede utilizarse como semiconductor en celdas solares como alternativa más fácil, barata y sostenible al silicio. En abril, investigadores de la Universidad Rey Abdullah de Ciencia y Tecnología de Arabia Saudita desarrollaron una nueva célula solar combinada de silicio y perovskita, que alcanzó una eficiencia del 33,2%, un récord mundial para células solares de dos uniones.

Celdas sensibilizadas por colorante (DSC). Se fabrican utilizando tintes orgánicos que capturan fotones de luz. Son más baratas de fabricar que las células solares de silicio, son más flexibles en su diseño e incluso pueden ser semitransparentes. Además, funcionan con un espectro de luz más amplio que las células solares de silicio tradicionales. Ambient Photonics, una startup respaldada por Amazon, ha terminado la construcción facilidad para manufacturar DSC, la cual afirma que sus productos pueden funcionar con bajos niveles de luz y pretende eliminar la necesidad de baterías en dispositivos electrónicos pequeños.

Energía termofotovoltaica. Mientras que las celdas fotovoltaicas normales responden a menos de la mitad de los rayos solares visibles, la energía solar termofotovoltaica genera electricidad a partir de las olas de calor. Antora Energy produce celdas termofotovoltaicas con una eficiencia del 40%. Adicional, investigadores de la Universidad de Houston han desarrollado un nuevo diseño de celdas termofotovoltaicas con una capa intermedia mejorada que evita el calor y que podría elevar aún más los niveles de eficiencia.

Materiales solares orgánicos. Estos materiales fotovoltaicos pueden tener 50 micras de grosor, menos que un cabello humano y pueden adherirse a cualquier superficie incluyendo superficies transparentes. Esta aplicación está pensada para aplicarse en edificios.

3.1.2 Energía eólica

Tecnología eólica flotante en alta mar. Crece con cambios en los diseños de las bases, configuraciones innovadoras de las turbinas y un mayor respaldo normativo en EE. UU. y Europa. En los últimos, las estructuras de gran tamaño se han popularizado a medida que los principales actores desvelan diseños innovadores. Entre ellos se encuentra Wind Catching Systems, una entidad en Noruega y pionera en el enfoque multiturbina, Gazelle con sede en Irlanda ha introducido un nuevo sistema híbrido de amarre dinámica con una estructura ligera, compacta y flexible.

Aerogeneradores verticales. SeaTwirl y el Marine Energy Test (Noruega) probarán un prototipo de eje vertical durante cinco años después de lograr la aprobación de las entidades regulatorias. Adicional, las turbinas eólicas verticales impresas en 3D están creciendo.

Sin aspas. La innovación en los aerogeneradores incluye diseños que van más allá de las palas tradicionales. O-Wind ha sido pionera en un diseño omnidireccional que capta simultáneamente vientos de todas las direcciones, está disponible en varios tamaños para adaptarse a cualquier construcción. Adicional, pueden conectarse a la red o funcionar independientemente con unidades de baterías. Xenecore, tiene un diseño que incorpora aspas en forma de abanico y espuma estructural de microesferas que amplifica la generación de energía. Y hay diferentes empresas trabajando en aerogeneradores sin aspas que funcionan a bajas velocidad del viento que aprovechan los vórtices, a través de un cilindro vertical con una varilla elástica que oscila dentro del alcance del viento y acciona un sistema de alternador para generar electricidad. Entre los principales están Vortex Bladeless, Tyer Wind, Agile Wind Power, Silent Wind y Sway Turbine AS en Europa; Saphon Energy en África; y Mag-Wind Vertical Axis Turbine, Atmocean, Enomad y SheerWind en Estados Unidos.

Energía eólica aerotransportada. Kitemill, una empresa noruega, es pionera en el avance de la energía eólica aerotransportada, que consiste en acoplar una turbina a un dispositivo volador, para mejorar la eficiencia. El sistema puede generar un ciclo de potencia medio de 100 kilovatios. Las compañías, EnerKíte y Volkswagen está realizando un estudio de viabilidad para explorar el potencial de una estación de móvil. Estas innovadoras turbinas eólicas aerotransportadas prometen cargar vehículos eléctricos incluso en las regiones más remotas, reduciendo la dependencia de las redes eléctricas convencionales.

Parques eólicos con IA. La IA también está transformando las energías renovables. La empresa israelí vHive ha presentado una herramienta avanzada para inspecciones de turbinas eólicas y una novedosa plataforma de gemelos digitales. Esta innovación permite a los parques eólicos digitalizar estratégicamente los activos, aumentar la eficiencia operativa y reducir la declinación de su producción. Reino Unido está trabajando con el parque eólico marino Robin Rigg de RWE, proporcionando un paquete basado en IA que incluye el reconocimiento de patrones y la previsión de la producción para garantizar un mantenimiento preciso y un rendimiento óptimo. La IA también está involucrada en la instalación, mantenimiento y mejora de parques eólicos marinos. El sistema de inspección Dhalion de Perceptual Robotics es un ejemplo interesante de solución totalmente autónoma para la inspección de aerogeneradores, que abarca la adquisición de datos y la toma de decisiones.

Producción de energía eólica gestionable. A medida que se encuentre la manera de almacenar energía eólica, ésta se convertirá en una solución de electricidad gestionable a partir de la cual las redes eléctricas podrán demandar electricidad en función de las necesidades del mercado. Una forma de garantizar este almacenamiento es fusionar el hidrógeno con la red como se está haciendo en los Países Bajos, donde una alianza liderada por Shell utiliza el hidrógeno de las centrales eólicas marinas para estabilizar la red eléctrica, y pretende mantener un 70% de electricidad renovable para 2030. El consorcio FlexH2, que incluye a TNO y otros agentes de la industria, colabora estrechamente en la investigación conjunta y el desarrollo tecnológico para acelerar la integración en la matriz energética.

3.1.3 Otras energías renovables

Geotermia. A diferencia de otras energías renovables, la geotérmica representa una fuente estable de energía que no fluctúa con la hora del día o del clima. Esta energía puede aprovecharse yacimientos de agua caliente y vapor bajo la corteza terrestre. Una vez obtenida puede utilizarse para calefacción directa o para generar electricidad a través de centrales geotérmicas.

Geotermia supercrítica. La producción de energía geotérmica supercrítica requiere profundizar más en la corteza terrestre que la geotérmica convencional, aprovechando temperaturas y presiones extremas (más de 374 grados Celsius y 221 bar, respectivamente).

Almacenamiento de energía geotérmica. Las técnicas de almacenamiento de energía geotérmica en forma de aumento de temperatura y presión que se bombea hacia el interior de la tierra y se libera cuando es necesario. En Estados Unidos, el Laboratorio Nacional de almacenamiento, y en Alemania, el Instituto de Tecnología de Karlsruhe está estudiando cómo integrar el almacenamiento geotérmico en la red existente.

Conversión de la energía térmica oceánica. Genera energía a partir de la diferencia de temperatura que existe en el agua del océano. Como esta diferencia no se ve afectada por las condiciones meteorológicas y climáticas, representa una fuente fiable de energía. Adicional, el agua de mar resultante del proceso puede utilizarse en aplicaciones comerciales como la pesca, la agricultura y el aire acondicionado. La naviera japonesa Mitsui O.S.K. Lines ha anunciado un programa piloto que bombear agua desde una profundidad de 600 metros a temperaturas cercanas al punto de congelación para utilizarla en un intercambiador de calor de titanio.

Energía hidroeléctrica. Con más del 15% de la generación mundial de electricidad en 2022, la energía hidroeléctrica sigue siendo la mayor fuente de energía renovable. Las nuevas oportunidades para la energía hidroeléctrica se manifiestan en la eficiencia, el almacenamiento y despliegues a pequeña escala. Las centrales hidroeléctricas han

invertido mucho en gestión digital de sus equipos y sistemas, todo ello con el fin de optimizar la entrega de energía y la seguridad. Utilizando la computación en nube y los macrodatos, los operadores esperan crear modelos de para guiar la toma de decisiones automatizada en estos entornos complejos. España ha realizado importantes inversiones hasta ahora, y las autoridades prevén integrar 160 centrales eléctricas a una plataforma digital de gestión. China también avanza en la digitalización de la presa de las Tres Gargantas (el mayor proyecto hidroeléctrico del mundo) con Huawei Cloud.

Pequeñas hidroeléctricas. Los proyectos hidroeléctricos a pequeña escala están permitiendo a los proveedores de energía de todo el mundo añadir más generación de energía renovable a su cartera sin necesidad de grandes inversiones iniciales de capital. En California, un programa piloto dirigido por la empresa Emrgy coloca pequeñas turbinas modulares en canales de riego para producir modestas cantidades de electricidad, entre 2 y 10 megavatios. Las turbinas funcionan manera que no es necesario represar el agua. Esto, unido al hecho de que todos canales utilizados son preexistentes, el impacto impacto en el medio ambiente local es mínimo.

Nuevos diseños de turbinas. Las empresas siguen innovando en el diseño de turbinas hidráulicas. Turbulent, una empresa belga ha desarrollado una turbina de vórtice submarina capaz de funcionar en lugares remotos. Con bajo y caudal de agua, es ideal para comunidades rurales con riego sencillo. Emrgy también trabaja en turbinas hidrocinéticas que pueden trabajar a baja presión y caudal. Voith Hydro (Alemania) ha adaptado el diseño centenario de la rueda Pelton que permite a sus turbinas funcionar en configuración horizontal, en lugar de vertical. Además, empresas como Natel trabajan para minimizar el impacto medioambiental de la energía hidroeléctrica. Su última turbina un diseño de flejes curvos reduce la tasa de mortalidad de las criaturas marinas que la atraviesan.

La energía hidráulica como acumulador de agua. El almacenamiento hidráulico, consiste en el bombeo de agua a embalses cuesta arriba cuando la energía es barata (o cuando funcionan las renovables) y dejar que el agua caiga cuesta abajo y genere energía cuando sea necesario. Suiza acaba de inaugurar una central de 20

gigavatios/hora en los Alpes suizos que puede pasar del almacenamiento a generación de energía en menos de 10 minutos.

3.1.4 Combustibles limpios

Hidrógeno. Los investigadores avanzan en la reducción el costo de la generación de hidrógeno ecológico. Muchos de estos esfuerzos se centran en mejorar los materiales que recubren los electrodos utilizados para extraer hidrógeno del agua. Equipos de investigación han perfeccionado revestimientos protectores de óxido de titanio que reducen la corrosión de los electrodos y han experimentado con el uso de nitruro de hierro, más barato, como recubrimiento alternativo. Un equipo de Oxford ha perseguido mejoras similares basadas en el recubrimiento, centrándose en los electrolizadores alcalinos. La empresa estadounidense TFP Hydrogen ha anunciado planes para triplicar su capacidad de recubrimiento de electrolizadores durante el próximo año, hasta alcanzar los 600 megavatios anuales. Loopflow, con sede en Canadá, ha desarrollado un nuevo diseño de pila de combustible con una geometría y un diseño que aumentan la estabilidad de las condiciones internas y la eficiencia. En la actualidad, el hidrógeno suele extraerse de agua dulce tratada, debido a la escasez de agua, las empresas de hidrógeno buscan fuentes alternativas. Los esfuerzos de la Isla de San Juan, los Países Bajos y Australia se han centrado en el uso del agua de mar, tanto tratada como sin tratar, para la generación de hidrógeno. Un programa piloto de la UE explorará el uso de aguas residuales como material de base. Otros están estudiando el acceso al hidrógeno geológico.

Biocarburantes. Los biocarburantes engloban cualquier combustible fabricado o derivado de materia orgánica, típicamente maíz caña de azúcar o soya. Estos combustibles incluyen el etanol, el biodiésel y el biogás. Aunque los biocombustibles representan una alternativa a los combustibles fósiles, ha surgido preocupación por la cantidad de tierras de cultivo necesarias para producir cantidades significativas de energía y el impacto que las operaciones a gran escala en los sistemas alimentarios.

Biocarburantes a partir del cáñamo. El cáñamo representa una oportunidad única para biocombustibles. Puede convertirse en múltiples tipos de combustible (etanol,

metanol, biodiésel, etc.) y posee una de las mayores densidades energéticas de todos los cultivos terrestres. Sin embargo, por su cercanía con la marihuana tiene restricciones de cultivo.

Biocombustibles a partir de algas. Mediante la fotosíntesis, algunos tipos de algas pueden producir biocombustible. Como ventajas añadidas, absorben dióxido de carbono y crecen orgánicamente. A pesar de ello, la extracción de biocombustible a partir de algas es lenta y cara. Investigadores de Brasil han realizado experimentos con microalgas para inducirles a producir más lípidos, el componente clave del biocombustible. Otros experimentos se han centrado en modificar genéticamente las algas para optimizar sus características de eficiencia y supervivencia. United Airlines ha invertido 5 millones de dólares en la nueva empresa de biocombustibles Viridos, dedicada a producir combustible sostenible para la aviación a partir de algas.

Syngas del sol. El gas de síntesis, o syngas, es una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono que puede utilizarse como combustible y en la producción de metanol. Investigadores de la Universidad de Cambridge han ideado un reactor alimentado por energía solar que extrae dióxido de carbono de residuos industriales, o incluso de la atmósfera, lo convierte en syngas utilizando lo que describen como hojas artificiales. La Universidad de Florida han demostrado la capacidad de crear gas de síntesis a temperaturas más bajas -700 grados Celsius en lugar de 1.000 una reducción que beneficia económicamente a los productores.

3.1.5 Energía nuclear

Fusión. En la actualidad, la mayoría de los reactores de fusión experimentales tratan de fusionar átomos de hidrógeno en helio, la misma reacción que nuestro sol ha llevado a cabo durante miles de millones de años. Esta reacción genera grandes cantidades de energía en forma de partículas atómicas que se mueven a gran velocidad para convertirse en calor y utilizarse para alimentar generadores. Los únicos subproductos son elementos más pesados (potencialmente útiles) y trazas de radiación a niveles inofensivos. Dada la abundancia del hidrógeno, la fusión nuclear una fuente de energía prácticamente ilimitada. Sin embargo, siguen existiendo obstáculos en términos de

inversión y tiempo necesario para que sea escalable. Incluso las estimaciones más generosas sitúan la fusión nuclear a gran escala a más de 30 años.

Reactores de sales fundidas. Aunque la idea de utilizar sales fundidas como refrigerante para reactores nucleares de fisión desde la década de 1950, fue más o menos abandonada ya que la mayoría de las comercializadas optaron por la refrigeración por agua. Ahora, empresas e investigadores están volviendo a considerar el concepto para aumentar la eficiencia (facilitando de extraer energía térmica), generar material fisible adicional (que puede participar en reacciones posteriores) y reducir los residuos radiactivos. Los investigadores del MIT tienen previsto explorar la viabilidad de los reactores de sales fundidas, mientras que empresas como Kairos Power y TerraPower están trabajando en desarrollo comerciales.

Fusión por láser. También conocida como fusión por confinamiento inercial, se obtiene disparando rayos láser de alta energía de deuterio y tritio para aumentar la temperatura y la presión. Marvel Fusion, una startup alemana planea construir un láser de alta potencia de 150 millones de dólares de alta potencia en la Universidad Estatal de Colorado. Con una fecha de finalización prevista de 2026, la instalación será el centro de investigación de fusión láser y física de alta densidad energética.

Pequeños reactores modulares. A principios de 2023, la Comisión Reguladora Nuclear de EE.UU. certificó el primer diseño de un pequeño reactor modular capaz de producir fisión nuclear. Estos pequeños reactores modulares se integran mucho más fácil en las redes existentes. El diseño aprobado tiene una potencia de 50 megavatios, aunque la empresa Nuscale espera que pronto se aprueben modelos de mayor capacidad.

3.1.6 Formas emergentes de generación de energía

Energía del aire. Se está desarrollando una nueva tecnología de energía limpia a partir de los materiales de la atmósfera terrestre. En la Universidad de Lovaina, investigadores belgas han creado paneles solares que producen hidrógeno a partir del vapor de agua de la atmósfera y lo convierten en electricidad con una pila de combustible de hidrógeno. Los paneles de hidrógeno saldrán al mercado a través de la

startup Solhyd, pueden producir hasta 250 litros de hidrógeno al día y el gas puede almacenarse en un depósito para su uso posterior. En la Universidad de Massachusetts Amherst, utilizan la electricidad generada de las gotas de agua que atraviesan el material poroso del generador. El generador de aire, o Air-gen, puede producir electricidad limpia casi en cualquier lugar y funciona sólo con la humedad del ambiente. Y en Australia, encontraron una enzima que puede convertir el aire en energía. La enzima, que suele encontrarse en el suelo, puede crear corrientes eléctricas utilizando pequeñas cantidades de hidrógeno en la atmósfera.

Energía de las olas. El uso de la energía de las olas para generar electricidad, es una industria en crecimiento que se espera que aumente un 4,7% hasta alcanzar los 30,44 millones de dólares para 2030. En Australia, Wave Swell Energy utiliza el concepto de columnas de agua oscilantes para alimentar sus turbinas. Eco Wave Power utiliza flotadores que pueden fijarse a estructuras artificiales existentes. Estos flotadores suben y bajan mueven un pistón, un acumulador y un motor hidráulico para generar energía en un generador.

Turbinas mareomotrices. Bajo el agua, las empresas transforman movimientos de la marea en electricidad. El proyecto escocés de energía mareomotriz MeyGen, un conjunto de cuatro turbinas submarinas ha generado 50 gigavatios/hora de electricidad hasta febrero de 2023. Esto equivale aproximadamente al consumo anual de electricidad de 4.700 hogares estadounidenses.

Imitar la fotosíntesis. Investigadores de la Universidad de Cambridge han hecho un descubrimiento revolucionario proceso de fotosíntesis que podría cambiar la forma de generar energía renovable y limpia. La fotosíntesis impulsa la mayor parte la vida en la Tierra, y antes se creía que los productos químicos que pueden extraer electrones se producían más tarde en el proceso de fotosíntesis. Sin embargo, los investigadores descubrieron que tiene lugar mucho antes y existen vías para mover electrones que hasta ahora se desconocían.

3.2 Cienciometría

Previo a presentar los resultados del análisis cuantitativo para el desarrollo del presente estudio de vigilancia tecnológica, se hace especial foco en dos aspectos importantes en la gestión de la energía: su generación y consumo, considerando será fue clasificación base que orientó las ecuaciones de búsqueda presentadas más adelante.

Generación. De acuerdo con XM, entidad encargada de la planeación, la supervisión y el control de la operación integrada de los recursos de generación, interconexión y transmisión del Sistema Interconectado Nacional, la generación se define como el proceso de producción de energía eléctrica cuya actividad principal es la generación de energía eléctrica. En esta clasificación se encuentran las plantas menores que por definición, tienen una capacidad instalada inferior a 20 MW y se excluyen de ésta, los autogeneradores y cogeneradores. Hay diferentes tipos de acuerdo con la fuente: Hidráulica, Biomasa, Eólica, Combustibles fósiles y Solar.

Consumo. Según la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), entidad encargada de reglamentar el comportamiento de los usuarios y las empresas con el objetivo de asegurar la prestación de estos servicios públicos en condiciones de eficiencia económica con una adecuada cobertura y calidad del servicio., el consumo se refiere al uso final de la energía generada. Asimismo, el mercado está compuesto por usuarios que se clasifican en regulados (Persona natural o jurídica cuyas compras de electricidad están sujetas a tarifas establecidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas. Aquí están la mayoría de los usuarios comerciales, oficiales y los residenciales clasificados por estratos socioeconómicos, y algunos industriales), no regulados (Persona natural o jurídica que realiza una demanda de energía superior a 2 Megavatios (2 MW). Ellos pueden negociar libremente los costos de las actividades relacionadas con la generación y comercialización de energía. En este nivel de consumo están industriales y comerciales que son grandes consumidores), y agentes (Llevar la energía al usuario final (generadores, transportadores, distribuidores, comercializadores y administradores).

3.2.1 Metodología

Para el análisis cuantitativo de la producción científica en torno a la transición energética, se implementó la siguiente metodología:

- Fase 1: Realizar búsquedas en bases de datos como Web Of Science, planteando inicialmente ecuaciones de búsqueda con palabras claves generales en el tema, como: energy transition, new technologies, strategies, generation, consumption, entre otros, haciendo un especial foco a las áreas de análisis definidas en el capítulo anterior.
- Fase 2: Recopilar los resultados e información de los artículos científicos para cada una de las búsquedas realizadas y procesarlos mediante el software VOSViewer, con el fin de identificar nuevas palabras clave, frecuencia y conexiones o coocurrencia entre las mismas.
- Fase 3: Realizar un análisis de clústeres que permita identificar nuevas palabras clave, específicamente tecnologías consideradas relevantes para la investigación.

3.2.2 Resultados de búsquedas en bases de datos

Para la búsqueda inicial, se tomaron varias palabras claves formando la ecuación “new technolog* OR strateg* AND energy transition” (ecuación de búsqueda No. 1), para la cual se encontraron 1.419. resultados.

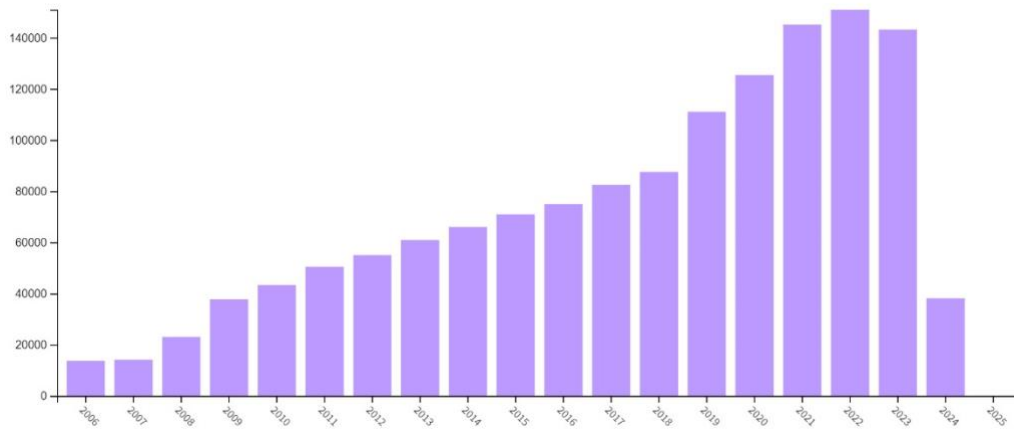
Posteriormente, se hizo especial foco en las áreas de análisis: generación y consumo. Para la primera, la ecuación de búsqueda fue “energy transition AND generation” (ecuación de búsqueda No. 2), obteniendo 24.642 resultados; mientras que para la segunda “energy transition AND consumption” (ecuación de búsqueda No. 3), se obtuvieron 11.741 resultados.

A continuación, se presentan los resultados para cada una de las ecuaciones de búsqueda:

Ecuación de búsqueda No. 1: New technolog* OR strateg* AND energy transition. Se evidencia que la tendencia de publicaciones ha ido aumentando en los últimos años, a excepción de un ligero decrecimiento presentado durante el 2023. En el

Top 5 de los principales centros de investigación que están publicando en el tema se encuentran: Chinese Academy of Sciences (China), University of California System (USA), Indian Institute of Techonology System IIT System (India), Centre National de la Recherche Scientifique CNRS (Francia), and United States Department of Energy Doe (USA).

Figura 20. Tendencia publicaciones ecuación de búsqueda No. 1



Fuente: Web of Science.

Figura 21. Principales centros de investigación ecuación de búsqueda No. 1

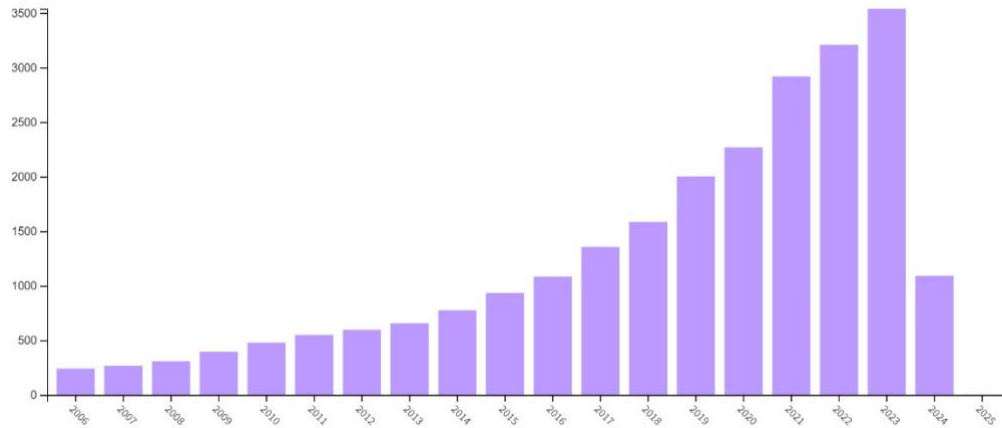


Fuente: Web of Science.

Ecuación de búsqueda No. 2: Energy transition AND generation. Se evidencia que la tendencia de publicaciones ha ido creciendo durante los últimos años.

En el Top 5 de los principales centros de investigación que están publicando en el tema se encuentran: United States Department of Energy Doe (USA), Chinese Academy of Sciences, University of California System (China), Centre National de la Recherche Scientifique CNRS (Francia), and Helmholtz Association (Alemania).

Figura 22. Tendencia publicaciones ecuación de búsqueda No. 2



Fuente: Web of Science.

Figura 23. Principales centros de investigación ecuación de búsqueda No. 2

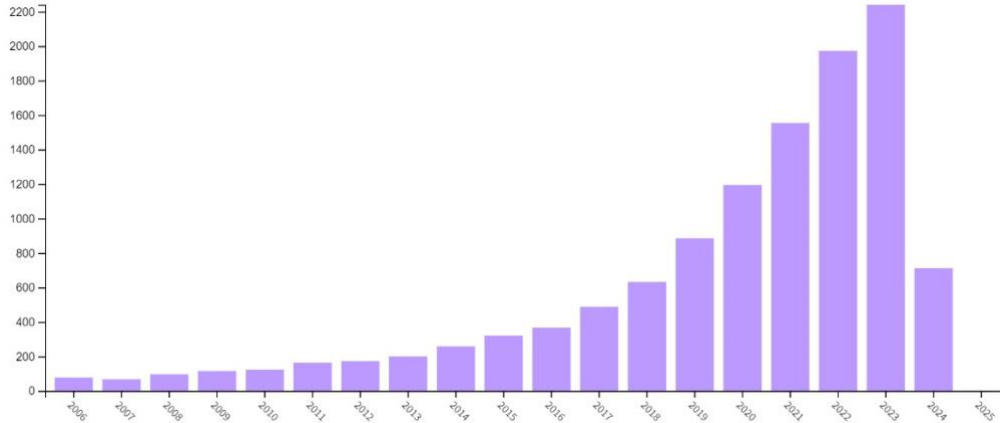


Fuente: Web of Science.

Ecuación de búsqueda No. 3: Energy transition AND consumption. Se evidencia una tendencia exponencial de crecimiento en las publicaciones durante los últimos años. En el Top 5 de los principales centros de investigación que están publicando en el tema se encuentran: Chinese Academy of Sciences (China), Tsinghua

University (China), United States Department of Energy Doe (USA), Centre National de la Recherche Scientifique CNRS (Francia), and University of California System (USA).

Figura 24. Tendencia publicaciones ecuación de búsqueda No. 3



Fuente: Web of Science.

Figura 25. Principales centros de investigación ecuación de búsqueda No. 3

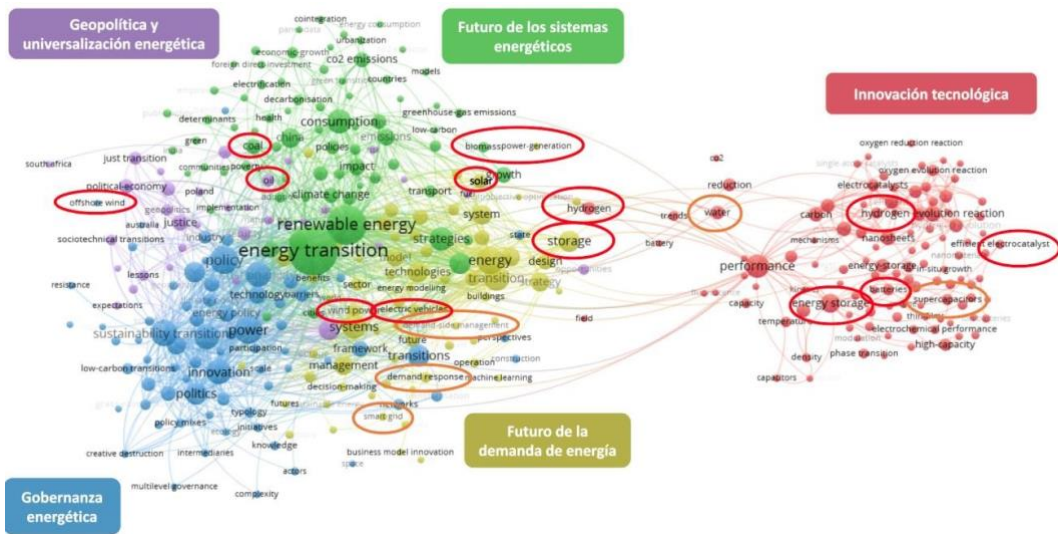


Fuente: Web of Science.

3.2.3 Análisis de clústeres

Mapa y clústeres ecuación No. 1. Entre las principales palabras clave encontradas se encuentran: energías renovables, eólica offshore, carbón, crudo, solar, biomasa, redes inteligentes, almacenamiento, hidrógeno, vehículos eléctricos, respuesta a la demanda, gestión de la demanda, baterías, entre otros.

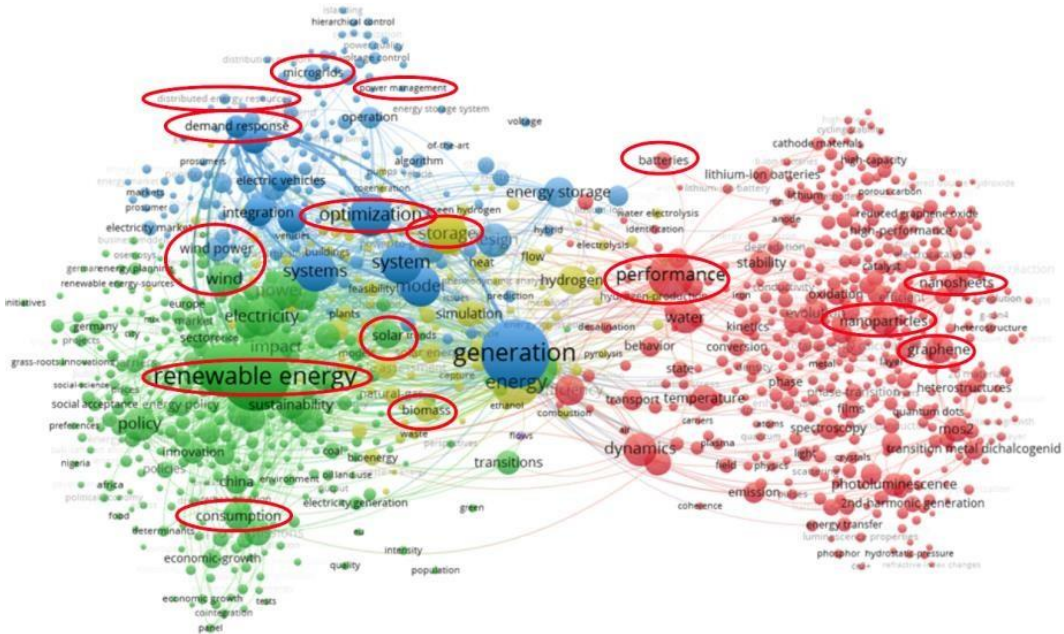
Figura 26. Mapa de coocurrencia para la ecuación de búsqueda No. 1



Fuente: Elaboración propia mediante VOSViewer.

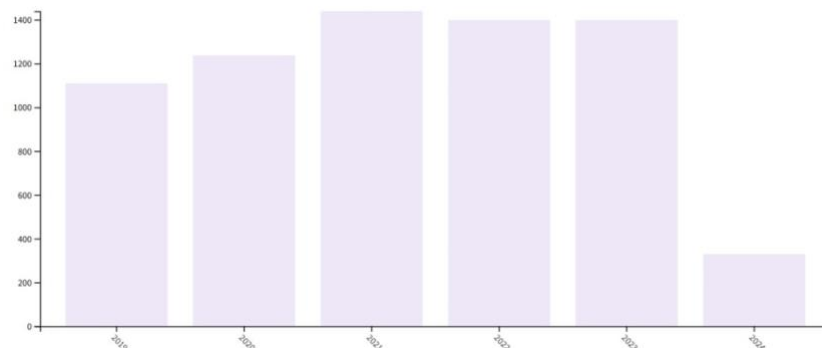
Mapa y clústeres ecuación No. 2. Entre las principales palabras clave encontradas se encuentran: energías renovables, eólica, optimización, desempeño, gestión de la demanda, almacenamiento, solar, biomasa, gestión de la energía, microrredes, recurso de energía distribuidos, baterías, nanopartículas, nanohojas, grafeno, entre otros.

Figura 27. Mapa de coocurrencia para la ecuación de búsqueda No. 2



Fuente: Elaboración propia mediante VOSViewer.

Figura 29. Tendencia de patentes sobre “concentrated solar”



Fuente: Web of Science

Tabla 6. Patente Energía solar concentrada

Palabra Clave	Concentrated Solar Power
Título	Material de almacenamiento de energía térmica basado en materiales de cambio de fase infiltrados en una estructura altamente porosa cerámica obtenida mediante impresión 3d
Oficina	No refiere
Fecha de presentación	09 01 2024
Fecha de publicación	18 07 2024
Número de patente	WO/2024/149921
Resumen	La presente invención se refiere a un material de almacenamiento de energía térmica basado en materiales de cambio de fase de alta temperatura infiltrados en una estructura cerámica con porosidad elevada y con un patrón ordenado producido mediante técnicas de fabricación aditiva o impresión 3D. Estos materiales evitan las pérdidas de fundido del material de

cambio de fase, son ligeros, resistentes mecánicamente y frente a la corrosión, y presentan elevadas entalpías de fusión y capacidad de almacenamiento de energía térmica. Estos materiales pueden ser utilizados en aplicaciones de alta temperatura para almacenamiento de energía térmica, por ejemplo, en plantas de energía solar por concentración, energía nuclear, aprovechamiento del calor generado en procesos industriales o en aplicaciones espaciales.

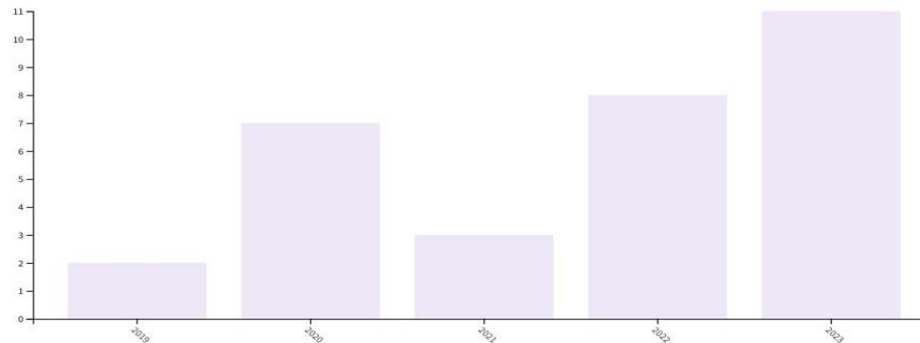
Link de consulta

[WO2024149921 MATERIAL DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA BASADO EN MATERIALES DE CAMBIO DE FASE INFILTRADOS EN UNA ESTRUCTURA CERÁMICA ALTAMENTE POROSA OBTENIDA POR IMPRESIÓN 3D.](#)

Fuente: WIPO

Sistemas solares híbridos (Multitasking Solar). Principales códigos: G06q-050/06, H 02j-007/35, H 02j-007/00, A 45b-001/00, A45b-003/00.

Figura 30. Tendencia de patentes sobre “multitasking solar”



Fuente: Web of Science

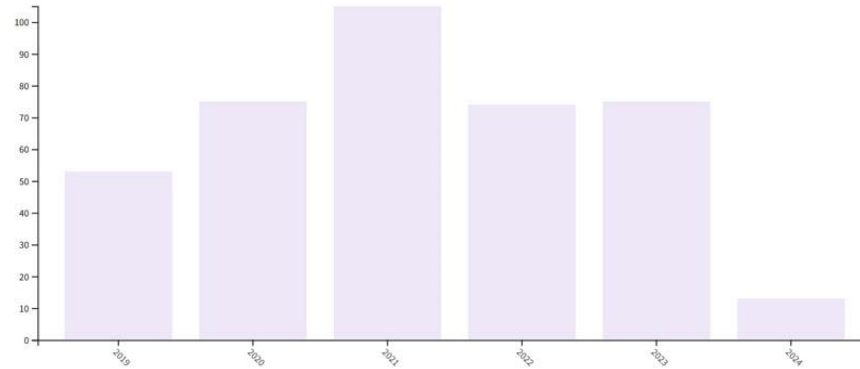
Tabla 7. Patente Sistemas solares híbridos

Palabra Clave	Sistemas solares híbridos
Título	Panel solar termofotovoltaico con batería térmica y sus aplicaciones
Oficina	No refiere
Fecha de presentación	26 01 2024
Fecha de publicación	02 08 2024
Número de patente	WO/2024/158277
Resumen	El sistema de almacenamiento y emisión de energía tiene un receptor que es calentado con energía solar u otra fuente calorífica o electromagnética. El receptor se calentará conforme vaya absorbiendo energía y a su vez emitirá energía por la parte posterior a un segundo receptor, teniendo así dos funciones tanto de almacenamiento como de emisor de radiación. El receptor tiene un panel solar fotovoltaico o bien una superficie con nanopartículas de óxido de grafeno, bióxido de titanio, óxido de zinc, grafeno funcionalizado con átomos de cobre, plata, cloro o bien cualquier otro tipo de nanopartículas que permitan la fotocatalisis y la eliminación de contaminantes a través de la carga eléctrica de los nanomateriales. El sistema permitirá purificar agua, eliminar CO2 del ambiente, generar energía eléctrica y almacenar energía al mismo tiempo.
Link de consulta	WO2024158277 PANEL SOLAR TERMOFOTOVOLTAICO CON BATERÍA TÉRMICA Y SUS APLICACIONES

Fuente: WIPO

Energía gestionable (Dispatchable Solar). Principales códigos: H02j-003/38, F28d-020/00, G06q-050/06, H02j-003/46, H02j 003/14.

Figura 31. Tendencia de patentes sobre “dispatchable solar”



Fuente: Web of Science

Tabla 8. Energía solar despachable

Palabra Clave	Dispatchable Solar Power
Título	Generación de electricidad flexible y despachable para redes descarbonizadas confiables utilizando motores de bajo costo multiplexados
Oficina	Estados Unidos
Fecha de presentación	01 08 2024
Fecha de publicación	28 11 2024
Número de patente	US/2024/0396365
Resumen	Se presentan sistemas modulares de generación eléctrica basados en Motores Automotrices Multiplexados (MAE) de bajo costo, diseñados para proporcionar electricidad distribuida y confiabilidad en redes descarbonizadas o como respaldo fuera de la red. Estos sistemas consisten en módulos de potencia transportables, cada uno con múltiples unidades generador-motor,

capaces de producir entre 1 y 2 MW. Su diseño ofrece alta flexibilidad en el uso de combustibles, rápida puesta en marcha, baja contaminación y adaptabilidad a diversas ubicaciones.

Los MAE pueden operar con gas natural, hidrógeno de bajo carbono y otros líquidos, incluso aquellos generados a partir de electricidad de la red. Además, pueden integrarse en sistemas de almacenamiento de energía, aprovechando el excedente de energía eólica o solar para producir combustibles reutilizables en la generación eléctrica cuando sea necesario.

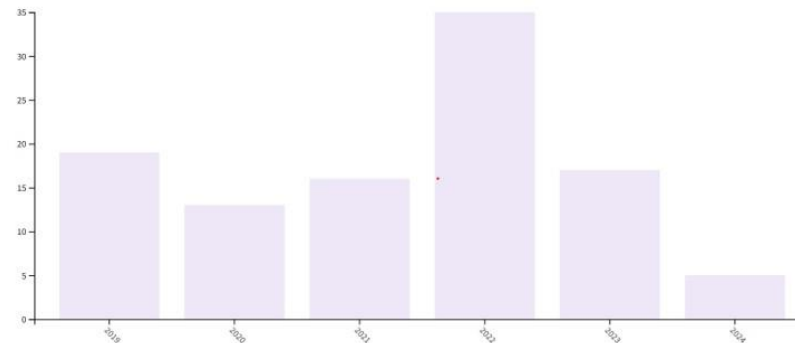
Link de consulta

[US20240396365 Dispatchable Flexible Electricity Generation for Reliable Decarbonized Grids using Multiplexed Low-Cost Engines](#)

Fuente: WIPO

Solar termofotovoltaica (Solar Thermophotovoltaics). Principales códigos: H011-031/0687, B22f-009/30, B82b-003/00, H011-031/0725, B82y-040/00.

Figura 32. Tendencia de patentes sobre “solar thermophotovoltaics”



Fuente: Web of Science

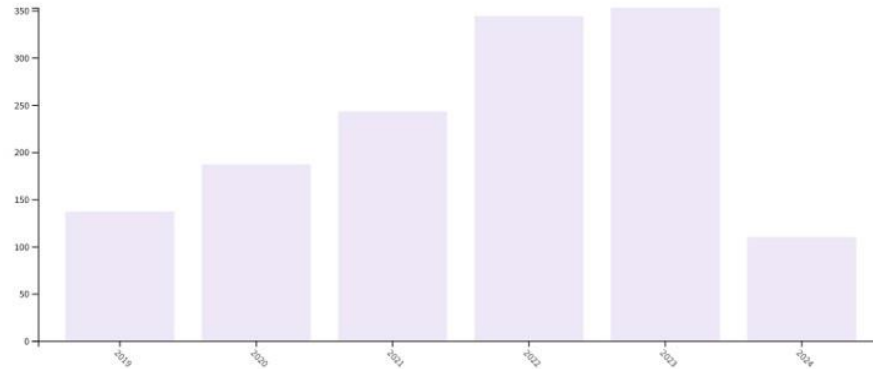
Tabla 9. Energía solar termofotovoltaica

Palabra Clave	Solar Thermophotovoltaics
Título	Solar Termofotovoltaica no recíproca
Oficina	Estados Unidos
Fecha de solicitud	13 03 2023
Fecha de publicación	05 10 2023
Número de patente	WO2023192016
Resumen	Un sistema termo-fotovoltaico solar no recíproco (STPV) convierte la radiación solar en electricidad mediante un absorbedor que capta radiación de amplio espectro y la transforma en calor, un emisor intermedio con propiedades radiativas no recíprocas, que absorbe luz en su cara frontal pero solo emite hacia la parte posterior, y una célula fotovoltaica de unión simple que convierte la radiación en electricidad. Esta configuración optimiza la transferencia de energía, minimiza pérdidas y mejora la eficiencia del sistema al dirigir la radiación térmica de manera controlada hacia la célula fotovoltaica.
Link de consulta	WO2023192016 NONRECIPROCAL SOLAR THERMOPHOTOVOLTAICS

Fuente: WIPO

Eólica flotante en alta mar (Offshore Floating Wind Turbines). Principales códigos: F03d-013/25, B63b-021/50, B63b-035/44, B63b-035/00, F03d011/04.

Figura 33. Tendencia de patentes sobre “offshore floating wind turbines”



Fuente: Web of Science

Tabla 10. Turbinas eólicas flotantes

Palabra Clave	Offshore Floating Wind Turbines
Título	Soporte para turbina eólica flotante
Oficina	España
Fecha de solicitud	19 12 2019
Fecha de publicación	30 04 2024
Número de patente	ES2967419
Resumen	Soporte flotante para una turbina eólica que comprende un miembro de soporte central, y al menos tres conjuntos de flotabilidad, cada uno conectado al miembro de soporte central a través de una viga conectora radial y mutuamente interconectados a través de una viga conectora transversal, caracterizado porque cada conjunto de flotabilidad comprende un

cuerpo conector que tiene dos lados radiales, un lado transversal hacia afuera y un lado transversal hacia adentro, en donde dos vigas conectoras transversales y una viga conectora radial se extienden lejos del lado transversal interno del cuerpo del conector, se proporcionan medios de anclaje en o cerca del lado transversal externo del cuerpo del conector y los lados radiales del cuerpo conector están conectados cada uno a un elemento de flotabilidad respectivo.

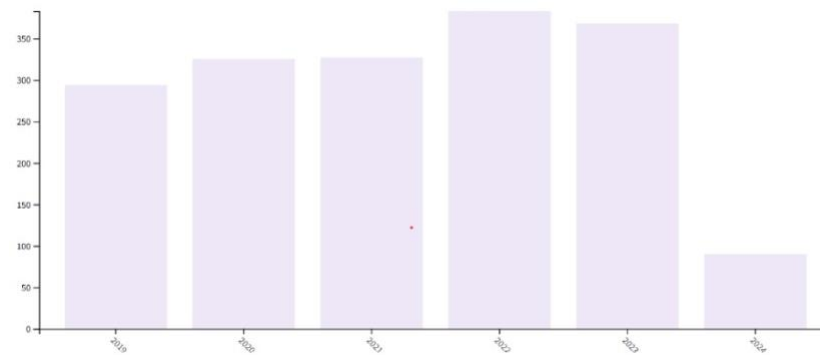
Link de consulta

[ES2967419 Soporte para turbina eólica flotante](#)

Fuente: WIPO

Aerogeneradores verticales (Vertical Wind Turbines). Principales códigos: F03d-003/06, F03d-003/00, F03d-009/00, F03d-003/04, F03d-011/00.

Figura 34. Tendencia de patentes sobre “vertical wind turbines”



Fuente: Web of Science

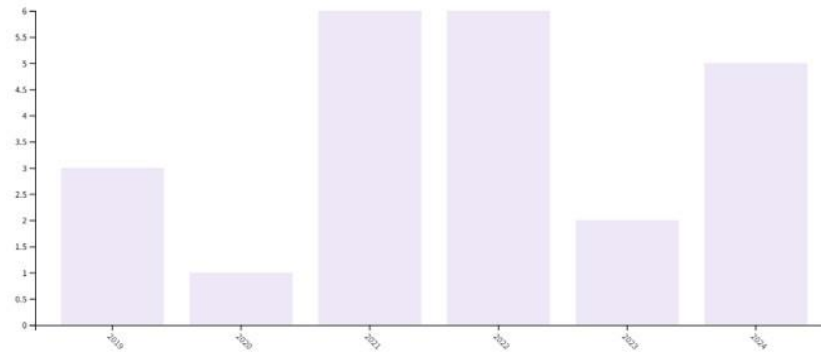
Tabla 11. Turbinas eólicas flotantes

Palabra Clave	Offshore Floating Wind Turbines
Título	Soporte para turbina eólica flotante
Oficina	España
Fecha de solicitud	19 12 2019
Fecha de publicación	30 04 2024
Número de patente	ES2967419
Resumen	Soporte flotante para una turbina eólica que comprende un miembro de soporte central, y al menos tres conjuntos de flotabilidad, cada uno conectado al miembro de soporte central a través de una viga conectora radial y mutuamente interconectados a través de una viga conectora transversal, caracterizado porque cada conjunto de flotabilidad comprende un cuerpo conector que tiene dos lados radiales, un lado transversal hacia afuera y un lado transversal hacia adentro, en donde dos vigas conectoras transversales y una viga conectora radial se extienden lejos del lado transversal interno del cuerpo del conector, se proporcionan medios de anclaje en o cerca del lado transversal externo del cuerpo del conector y los lados radiales del cuerpo conector están conectados cada uno a un elemento de flotabilidad respectivo.
Link de consulta	ES2967419 Soporte para turbina eólica flotante

Fuente: WIPO

Aerogeneradores sin aspas (Going Bladeless). Principales códigos: F04d-025/08, F04b-041/06, F03d-009/25, F04d-029/70, F04f-005/16.

Figura 35. Tendencia de patentes sobre “going bladeless”



Fuente: Web of Science

Tabla 12. Turbinas eólicas sin aspas

Palabra Clave	Bladeless Wind Turbine
Título	Sistema de generador de turbina eólica sin aspas
Oficina	China
Fecha de solicitud	22 07 2021
Fecha de publicación	01 10 2021
Número de patente	CN113464359
Resumen	La invención describe un sistema de generador de turbina eólica sin aspas que comprende específicamente una base, y la base está provista de una base de montaje y un transductor de vibración dispuestos en la base; un

dispositivo de protección de reinicio está dispuesto sobre el lado exterior de la base; el viento sin aspas El sistema generador de turbina comprende además una varilla de vibración inducida por vórtice, y la varilla de vibración inducida por vórtice está provista de un cuerpo de varilla de vibración y un eje de conexión de fibra de carbono dispuesto en la parte inferior de la varilla de vibración inducida por vórtice; Y la varilla de vibración inducida por vórtice se instala en el transductor de vibración en la base a través del eje de conexión de fibra de carbono. La invención se refiere al campo técnico de la industria de la energía eólica. De acuerdo con el sistema de generador de turbinas eólicas sin aspas, a través de la disposición de turbinas eólicas verticales, no solo se puede reducir el área ocupada, sino que también se puede aumentar la tasa de utilización de las posiciones de colocación y distribución; La energía eólica se convierte en energía eléctrica a través del transductor de vibración instalado en la parte inferior, y la vida útil de toda la varilla de vibración inducida por vórtice se puede prolongar adoptando el eje de conexión de fibra de carbono de manera cooperativa; Y en comparación con los materiales metálicos comunes, la resistencia a la fatiga es mayor.

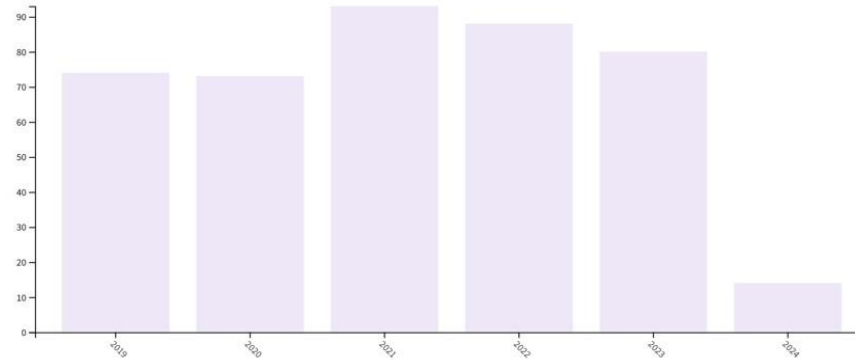
Link de consulta

[CN113464359 Sistema de generación de turbinas eólicas sin aspas](#)

Fuente: WIPO

Energía eólica aerotransportada (Airborne Wind Energy). Principales códigos: F03d-005/00, F03d-009/00, B64c-039/02, B64c-031/06, F03d-009/25.

Figura 36. Tendencia de patentes sobre “airborne wind energy”



Fuente: Web of Science

Tabla 13. Energía eólica en el aire

Palabra Clave	Airborne Wind Energy
Título	Método de operación de un sistema para la producción de energía eólica en el aire y el sistema respectivo
Oficina	Australia
Fecha de solicitud	10 11 2023
Fecha de publicación	23 11 2023
Número de patente	AU2023263554
Resumen	Método de operación para un sistema de generación de energía eólica aerotransportada que incluye una estación en tierra, un planeador con perfil aerodinámico y un cable de sujeción que lo conecta a la estación. El sistema

genera electricidad aprovechando la sustentación creada por el perfil aerodinámico al ser expuesto al viento, alternando dos fases operativas: una de extensión del cable, donde el planeador se aleja de la estación, y otra de retracción del cable, donde el planeador regresa. El método optimiza la eficiencia al monitorear las condiciones del viento y, cuando este cae por debajo de un umbral mínimo, el planeador es traccionado hacia la estación para aumentar su velocidad, permitiendo que en la siguiente fase de extensión gane mayor altitud y mejore el aprovechamiento del recurso eólico.

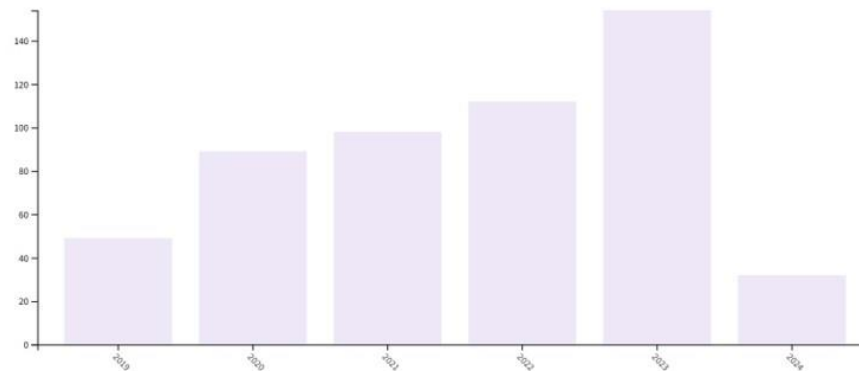
Link de consulta

[AU2023263554 Method for operation of a system for airborne wind energy production and respective system](#)

Fuente: WIPO

Oceánica maremotérmica (Ocean Thermal Energy Conversion). Principales códigos: F03g-007/05, F03g-007/04, F01k-025/10, B63b-035/44, C02f-103/08.

Figura 37. Tendencia de patentes sobre “Ocean Thermal Energy Conversion”



Fuente: Web of Science

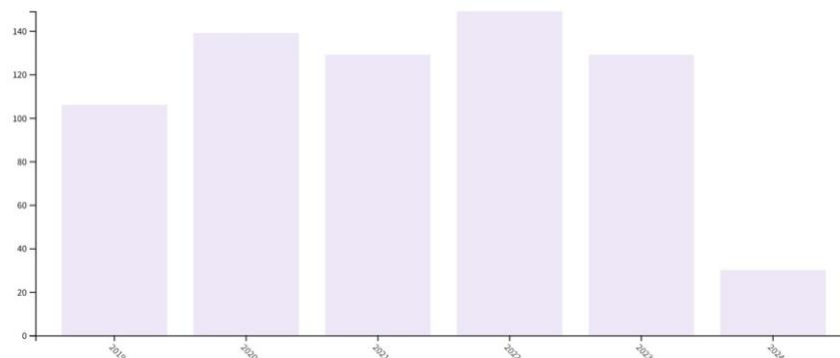
Tabla 14. Energía térmica oceánica

Palabra Clave	Ocean Thermal Energy Conversion
Título	Central de conversión de energía térmica oceánica
Oficina	Estados Unidos
Fecha de solicitud	06 11 2023
Fecha de publicación	26 09 2024
Número de patente	US20240318640
Resumen	Una estructura de generación de energía maremotérmica ubicada en alta mar, que consta de una sección sumergida e integrada por varios subsistemas clave: una primera plataforma con un sistema de evaporación multietapa, una segunda plataforma con un sistema de condensación multietapa, y una tercera plataforma que alberga el equipo de generación de energía. Además, la estructura incluye una tubería de agua fría y su correspondiente conexión, esenciales para el aprovechamiento del gradiente térmico oceánico, donde el agua cálida de la superficie se evapora para accionar turbinas y luego se condensa con agua fría extraída de las profundidades, permitiendo la producción continua de electricidad.
Link de consulta	US20240318640 Ocean Thermal Energy Conversion Power Plant

Fuente: WIPO

Pequeñas hidroeléctricas (Small Scale Hydro). Principales códigos: F03b-017/06, F03b-007/00, F03b-011/00, F03b-013/00, H02j-003/38.

Figura 38. Tendencia de patentes sobre “small scale hydro”



Fuente: Web of Science

Tabla 15. Energía térmica oceánica

Palabra Clave	Small Scale Hydro
Título	Diseño y Fabricación de un Generador Hidroeléctrico Portátil
Oficina	India
Fecha de solicitud	01 03 2023
Fecha de publicación	17 03 2023
Número de patente	IN202341013724
Resumen	Las turbinas de Tornillo de Arquímedes (AST, por sus siglas en inglés) representan una solución innovadora para pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), especialmente en zonas con baja altura de caída de agua. Estas turbinas ofrecen una fuente de energía renovable y limpia, además de ser una opción más segura para la vida silvestre, en particular para los peces, en

comparación con otros métodos de generación hidroeléctrica. Los ASTs no son aplicables en todos los escenarios, pueden generar beneficios económicos, sociales y ambientales clave para el desarrollo sostenible de la energía hidroeléctrica. Funcionan eficientemente en saltos de agua inferiores a 5 metros, con una eficiencia operativa que varía entre 60% y 80%, adaptándose a diferentes caudales. En sitios de baja altura de caída, pueden ser una opción más rentable que otros sistemas hidroeléctricos debido a costos de instalación y operación más bajos. Los ASTs reducen el impacto ambiental, minimizando la alteración de los procesos naturales de sedimentación y erosión, y afectan en menor medida la fauna acuática. Este proyecto analiza las características de estas turbinas y su potencial para fortalecer la sostenibilidad en la generación hidroeléctrica.

Link de consulta

[IN202341013724 DESIGN AND FABRICATION OF PORTABLE HYDRO POWER GENERATOR](#)

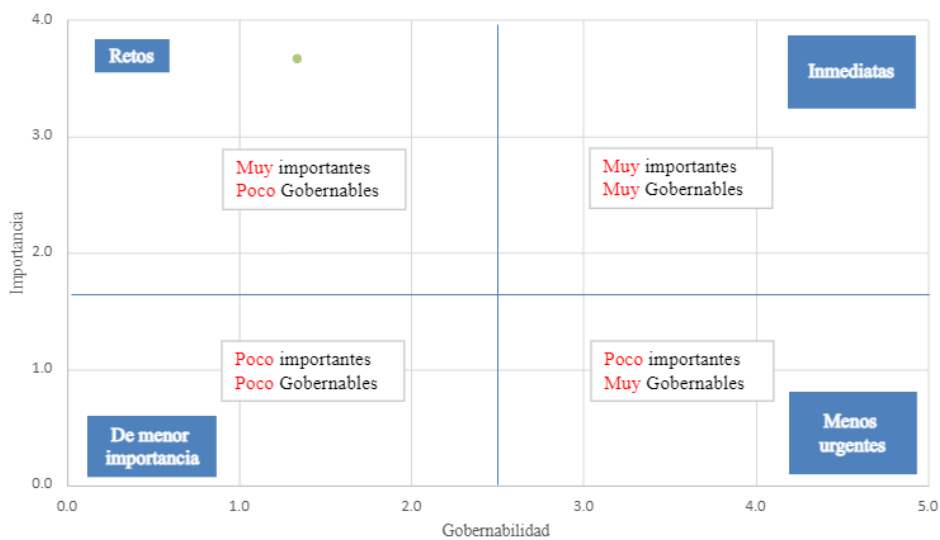
Fuente: WIPO

3.4 Priorización de tecnologías mediante IGO

Con base en las principales tecnologías identificadas anteriormente que presentan mayores avances e implementación a nivel global, se realizó un primer taller con trece (13) expertos con el propósito de priorizarlas según su pertinencia y gobernabilidad para Colombia.

Como contexto, se aclara que la matriz IGO puede leerse en un plano cartesiano donde Importancia se representa en “eje Y” y Gobernabilidad en el “eje X”, donde Importancia se refiere a la pertinencia para el futuro y la Gobernabilidad al control que se posee sobre cada factor. Este plano se divide en 4 zonas: zona de alta importancia, zona de baja importancia, zona de alta gobernabilidad y zona de baja gobernabilidad.

Figura 39. Matriz IGO referencia



Fuente: Elaboración propia

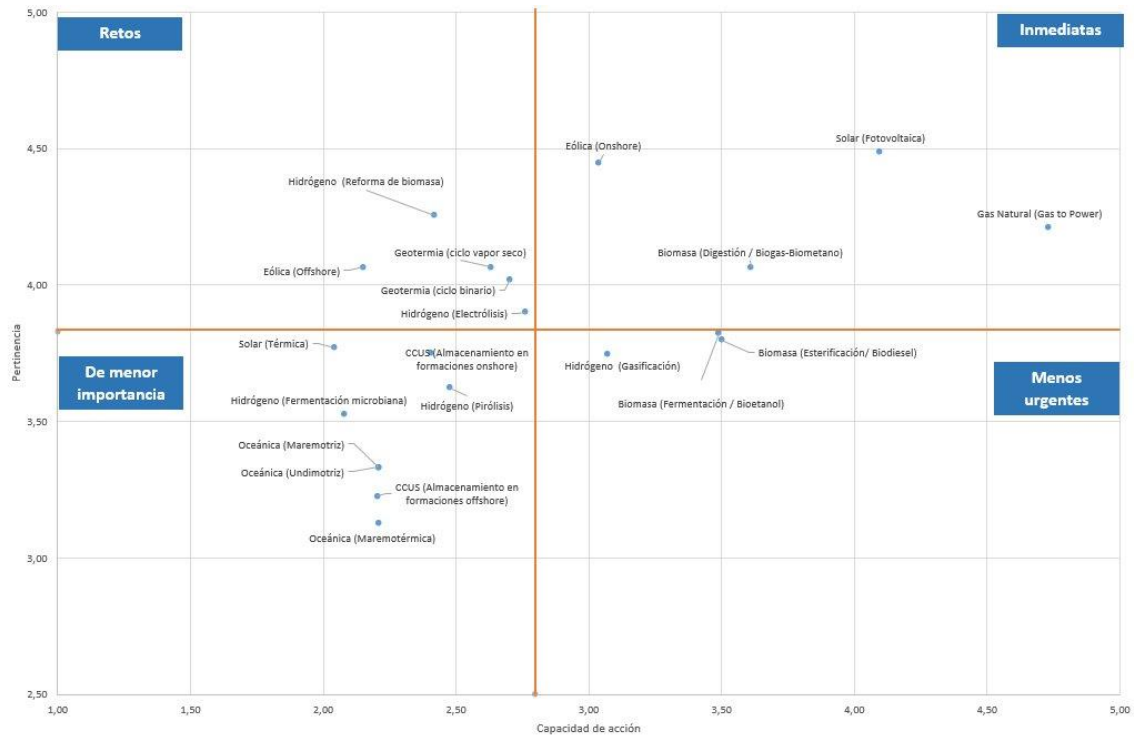
Como resultado se obtuvo la matriz IGO plasmada en la Figura 40, considerando que:

- **Importancia:** Se asigna a cada factor un puntaje entre 1 y 5, el cual permite visualizar la pertinencia de menor a mayor grado así: (1) Sin importancia, (2) Poco importante, (3) Duda, (4) Importante, (5) Muy importante.

Nota: Clasificar máximo el 20% como "(5) Muy importante", para este ejercicio (3) factores.

- **Gobernabilidad:** Se clasifica teniendo como base unos criterios de control sobre la gestión de la organización para ejecutar estrategias: (0) Nula, (1) Débil, (3) Moderada, (5) Fuerte.

Figura 40. Tecnologías priorizadas mediante matriz IGO



Fuente: Elaboración propia

Con base en las respuestas suministradas por los expertos, se identifica que:

- Las tecnologías para priorizar, ya que son consideradas de alta pertinencia y capacidad de acción, son la energía solar fotovoltaica, la eólica *on-shore*, el gas natural, la biomasa mediante digestión para producción de biogás y biometano.
- Son considerados retos, por su alta pertinencia pero baja capacidad de acción en el país, tecnologías como hidrógeno (electrólisis y reforma de biomasa), eólica *off-shore* y geotermia.
- Tecnologías como el hidrógeno mediante gasificación, biomasa mediante esterificación y fermentación son consideradas de alta y media capacidad de

acción, sin embargo, se encuentran ubicadas por debajo de la media de pertinencia.

- Son consideradas tecnologías de menor importancia, por su baja pertinencia en el país y baja capacidad de acción, la solar térmica, hidrógeno mediante fermentación microbiana, hidrógeno mediante pirólisis, energías oceánicas y almacenamiento de carbono.
- Entre las recomendaciones de los expertos se sugiere considerar tecnologías y energías como la nuclear, el hidrógeno blanco, la biomasa no forestal, los sistemas de almacenamiento de energía y diferencial salino en estuarios.
- Surgen como estrategias clave a considerar la agrovoltaica, economía circular, vehículos eléctricos y microrredes.

Capítulo 4. Inteligencia Competitiva

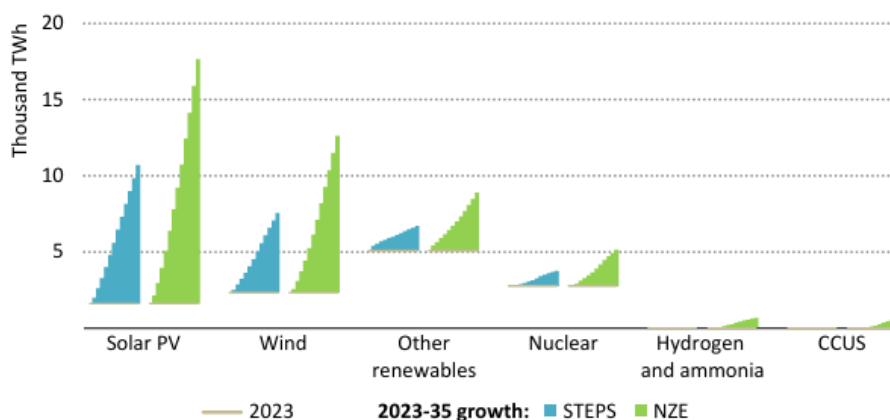
El siguiente análisis de inteligencia competitiva para el sector energético permite visualizar el panorama competitivo, aprender de las mejores prácticas de líderes globales, entender dinámicas de mercado y diseñar estrategias informadas que potencien ventajas competitivas para la transición energética en Colombia al 2040.

4.1 Contexto Global

La participación de los combustibles fósiles en el consumo final de energía está disminuyendo en todos los escenarios. Por ejemplo, en el escenario de políticas establecidas (STEPS), la participación cae del 66% en 2023 al 55% en 2050. En el escenario de cero emisiones netas (NZE), esta proporción desciende aún más, a menos del 20% para 2050.

Adicional, de acuerdo con el informe World Energy Outlook 2024 de la Agencia Internacional de Energía (IEA), los riesgos geopolíticos derivados de los conflictos en Ucrania y el Medio Oriente evidenciaron la necesidad urgente de diversificar las fuentes de energía y garantizar la seguridad de las cadenas de suministro. En este contexto, y con el objetivo de acelerar la transición energética, las energías renovables se proyectan como el motor principal del crecimiento en capacidad eléctrica instalada, representando más del 50% de la expansión para 2030, impulsadas por políticas climáticas y su creciente competitividad económica.

Figura 41. Aumento de la generación mundial de energía limpia por fuente y escenarios



Fuente: World Energy Outlook 2024 IEA

4.2 Competidores y Posicionamiento en el Mercado

En el informe de Statista 2024 de la industria de energía renovable en el mundo se realizó un análisis comparativo de las energías renovables desde la capacidad, la generación, el consumo, las compañías, la tecnología y la inversión.

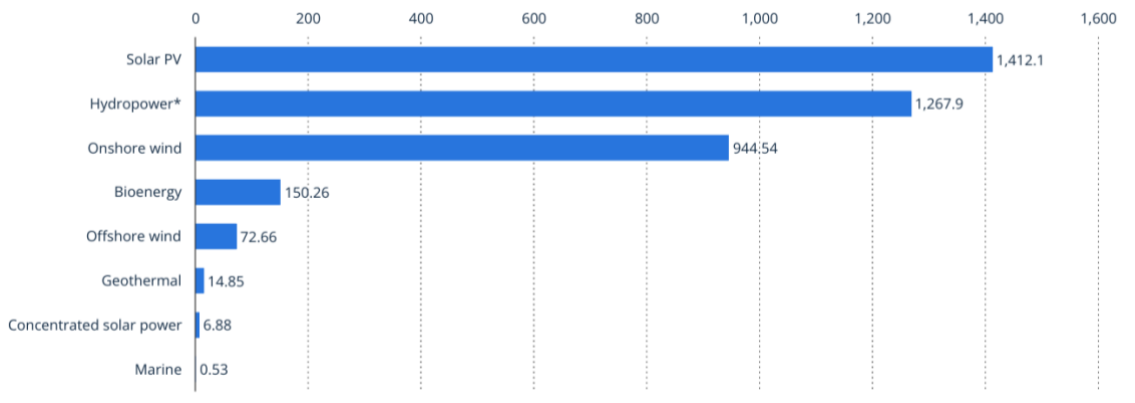
4.2.1 Capacidad

Durante 2023, la energía solar fotovoltaica fue la tecnología renovable con mayor capacidad instalada en todo el mundo, con 1,41 teravatios (TW), seguida por la hidroeléctrica, con una capacidad instalada de 1,27 TW en todo el mundo. Durante este año, la capacidad mundial instalada de energías renovables alcanzó unos 3,87 TW, frente a los 3,4 TW de un año antes (Figura 42).

Por otro lado, Asia es la región dominante en capacidad instalada, representando la mayor proporción casi duplicando a Europa, que ocupa el segundo lugar (Figura 43).

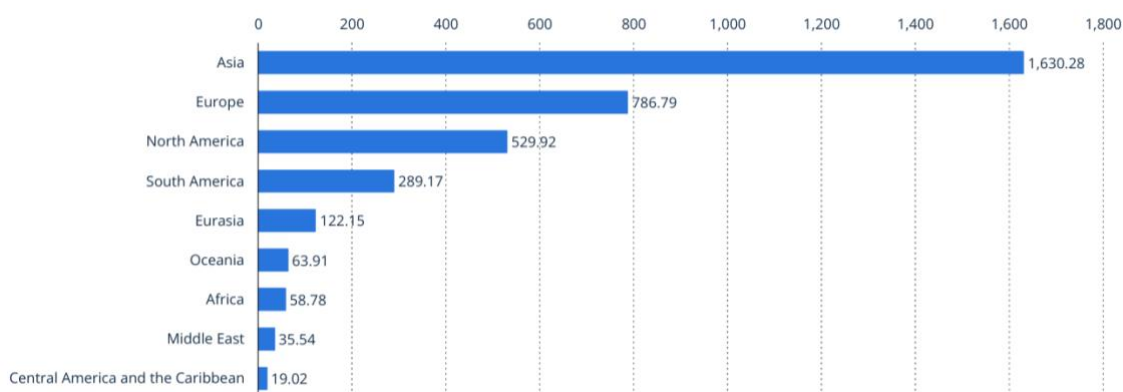
En concordancia con el comparativo por regiones, se encuentra que China es el país con la mayor capacidad instalada de energías renovables, seguido por Estados Unidos (Figura 44).

Figura 42. Capacidad energía renovable acumulada mundial instalada 2023, por tecnología



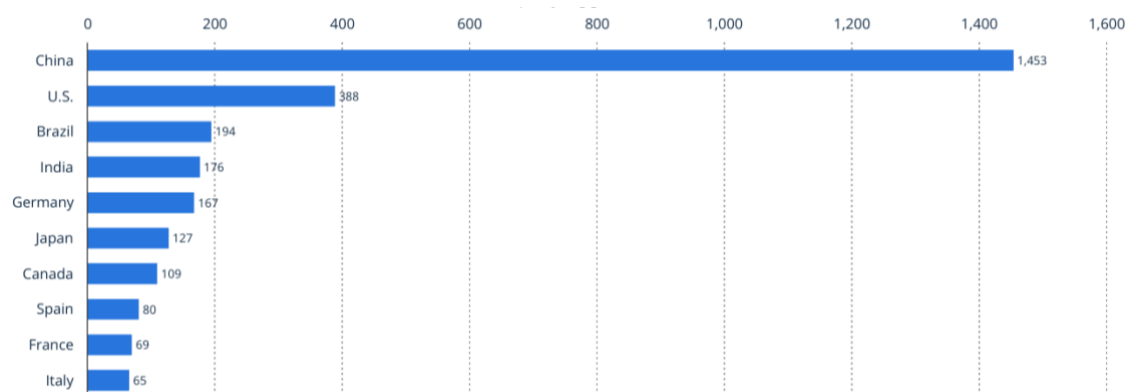
Fuente: Statista

Figura 43. Capacidad mundial acumulada de energías renovables instalada en 2023, por regiones



Fuente: Statista

Figura 44. Capacidad de energías renovables instalada en 2023, por países



Fuente: Statista

4.2.2 Generación

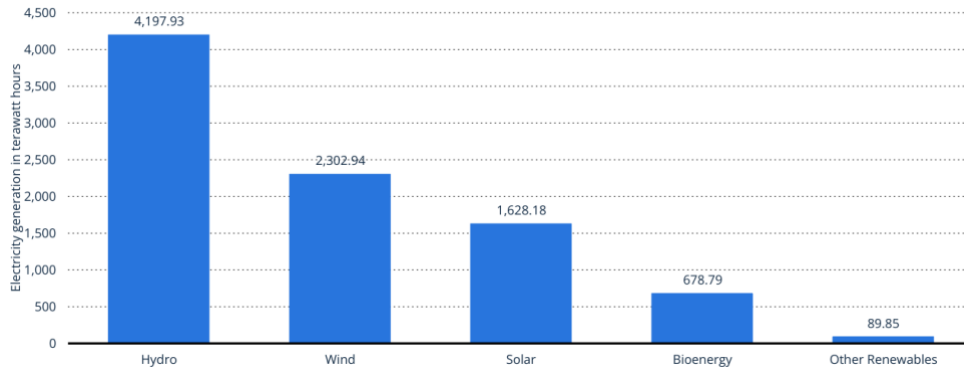
En 2023, la generación hidroeléctrica mundial se situó en 4,2 petavatios hora (PWh). Fue la mayor fuente de energía renovable del mundo, seguida de la eólica y la solar. La generación eólica se situó en 2,3 PWh ese año (Figura 45).

En la Figura 46 se observa la cantidad de electricidad generada en teravatios hora (TWh) donde Asia domina con 3,748.55 TWh, seguida de América del Norte (1,492.54 TWh) y Europa (1,461.75 TWh). Regiones como Sudamérica (960.47 TWh) y Eurasia (362.64 TWh) tienen contribuciones menores pero relevantes.

En términos de participación de las fuentes renovables en la generación eléctrica total, Latinoamérica y el Caribe lideran con un 62%, aunque la cantidad generada sigue siendo menor que en Asia o América del Norte. Oceanía (43%) y Europa (39%) tienen

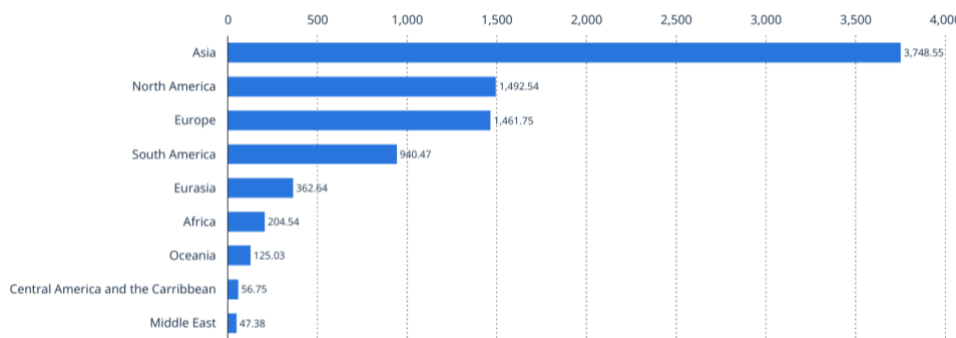
una alta proporción de renovables en su matriz energética. Aunque Asia (27%) y África (24%) tienen una menor participación de renovables, Asia sigue siendo el mayor generador (Figura 47).

Figura 45. Generación mundial de electricidad a partir de energía renovable 2023, por fuente



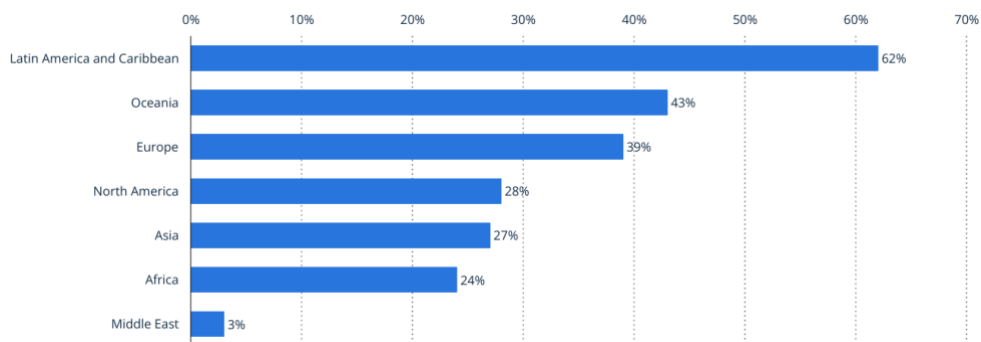
Fuente: Statista

Figura 46. Generación mundial de electricidad a partir de energía renovable 2022, por región



Fuente: Statista

Figura 47. Participación energía renovable 2023 en generación, por región

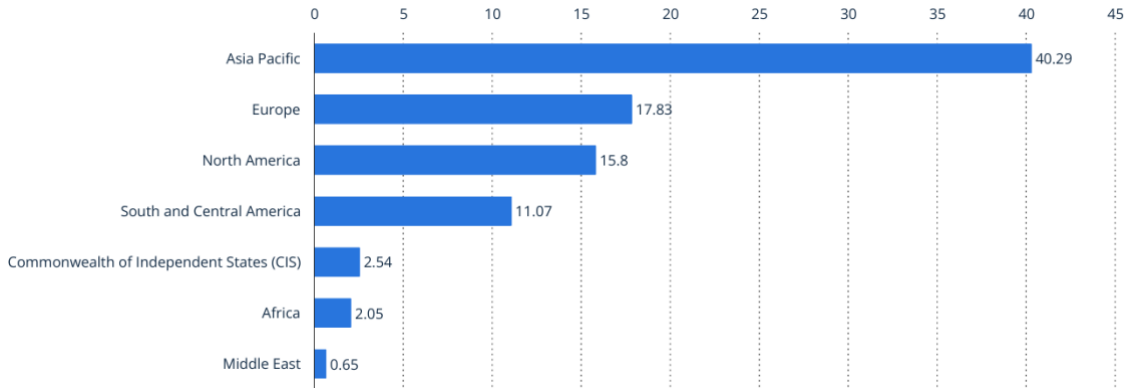


Fuente: Statista

4.2.3 Consumo

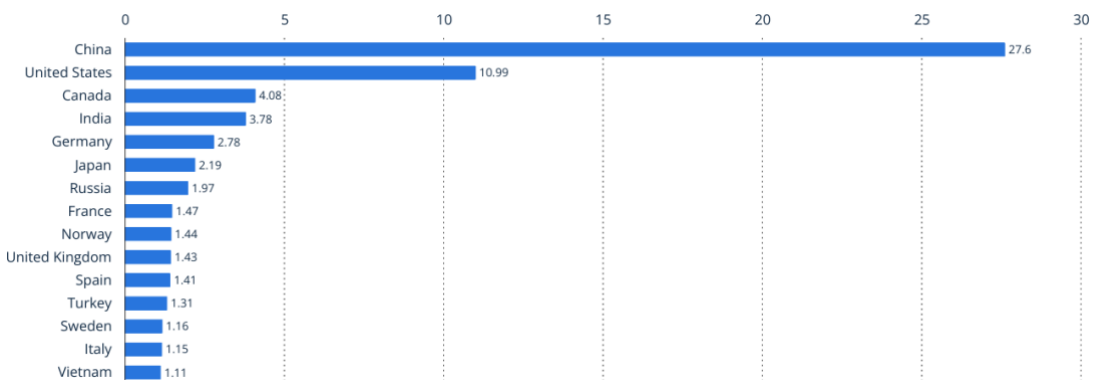
En 2023, la región de Asia-Pacífico consumió aproximadamente 40,3 exajulios de energía renovable, más que otra región del mundo. Le siguió Europa, con un consumo de energía renovable de unos 17,8 exajulios.

Figura 48. Consumo energía renovable 2023, por región



Fuente: Statista

Figura 49. Consumo energía renovable 2023, por país

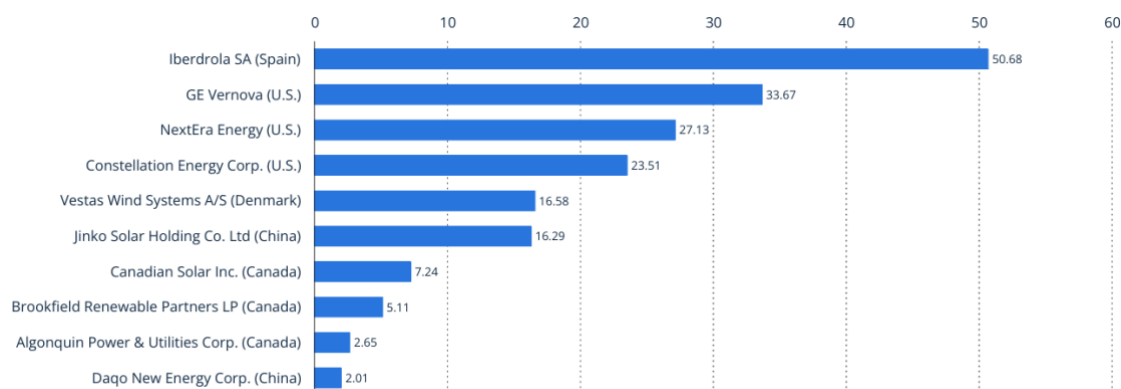


Fuente: Statista

4.2.4 Compañías

Iberdrola, con sede en España, fue considerada la primera empresa mundial de energías renovables en 2024, en función de sus ingresos, con más de 50.000 millones de dólares en julio de 2024. GE Vernova ocupaba el segundo lugar con más de 33.000 millones de dólares de ingresos.

Figura 50. Principales empresas de energías renovables del mundo en 2024, por ingresos

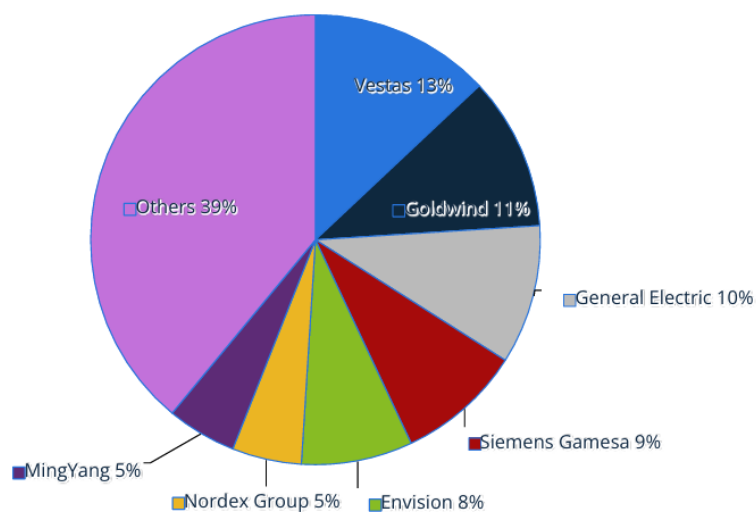


Fuente: Statista

4.2.5 Tecnología

Energía eólica. Vestas fue el principal fabricante de aerogeneradores por capacidad de producción en 2022, con unos 20 gigavatios o una cuota del 13% de la capacidad de fabricación mundial. Goldwind y General Electric le seguían con una cuota de capacidad de producción del 11% y el 10%, respectivamente.

Figura 51. Capacidad de producción de los principales fabricantes de aerogeneradores del mundo 2022

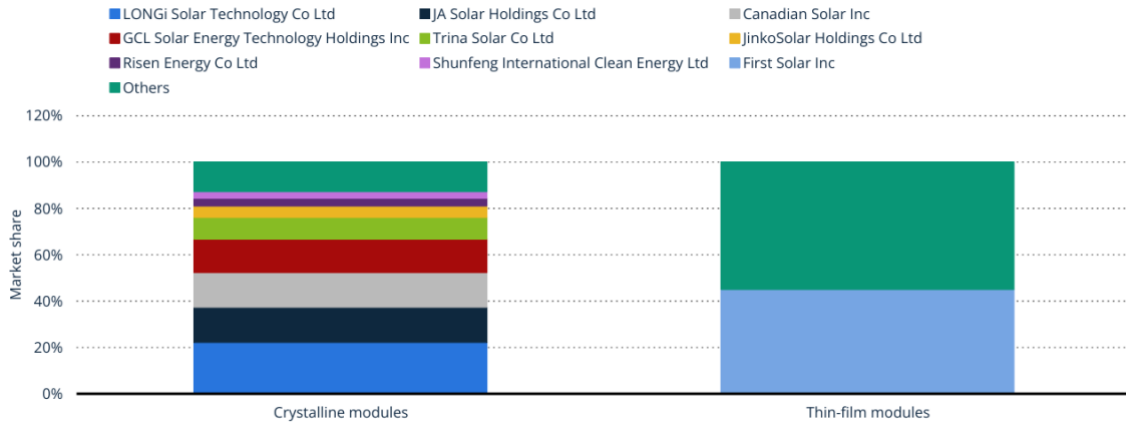


Fuente: Statista

Energía solar. En 2021, LONGi Solar Technology Co Ltd representaba casi el 22,1% del mercado mundial de módulos solares fotovoltaicos cristalinos. En

comparación, First Solar Inc representaba alrededor del 45% del mercado mundial de módulos solares fotovoltaicos de capa fina.

Figura 52. Participación en mercado de los fabricantes de módulos fotovoltaicos cristalinos y de capa fina durante 2021

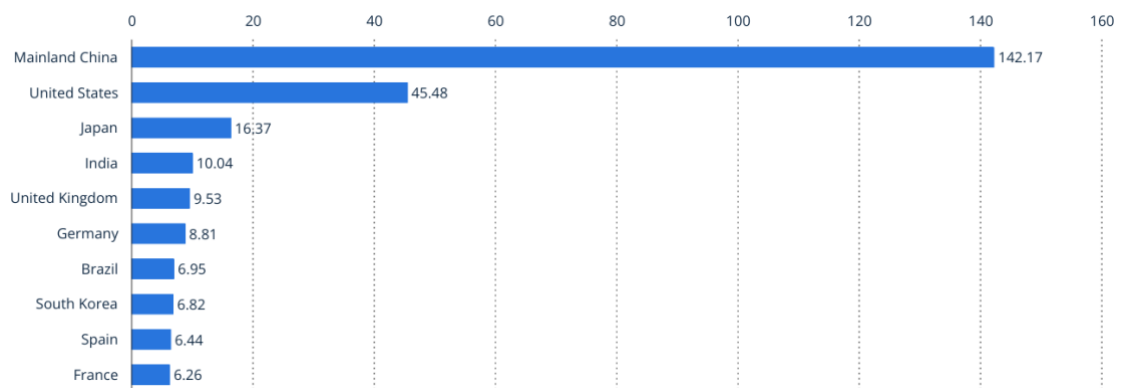


Fuente: Statista

4.2.6 Inversión

En 2021, China fue el país del mundo con la mayor inversión en financiación de activos en tecnologías renovables, con más de 142.000 millones de dólares. Le siguen Estados Unidos y Japón, con inversiones en financiación de activos renovables de aproximadamente 45.500 y 16.400 millones de dólares estadounidenses, respectivamente.

Figura 53. Inversiones en financiación de activos de energías renovables en el mundo 2021, por países.

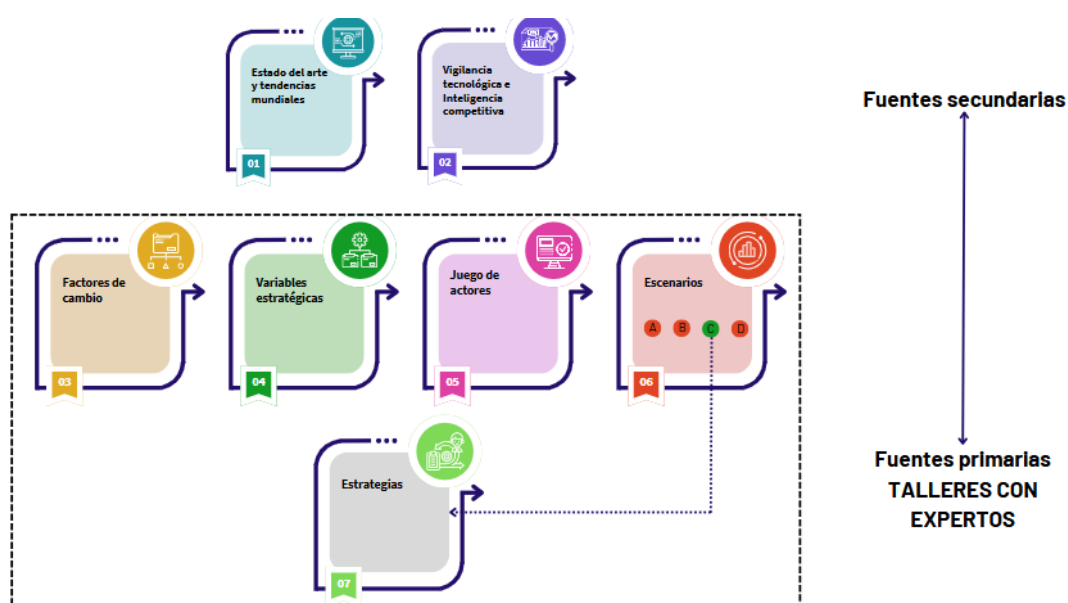


Fuente: Statista

Capítulo 5. Análisis Prospectivo Estratégico

De acuerdo con la metodología del modelo prospectivo estratégico, plasmada en la siguiente figura, se realizan los talleres con expertos para continuar con el flujo de trabajo teniendo en cuenta la información recopilada en los dos primeros pasos de estado del arte, tendencias, inteligencia tecnológica y competitiva.

Figura 54. Modelo prospectivo estratégico



Fuente: Elaboración propia

5.1 Factores de Cambio

Para identificar los factores de cambio, se convocó a un grupo multidisciplinario de expertos provenientes de diversas áreas, incluyendo derecho, energía, energías renovables e investigación académica. A partir del instrumento de trabajo, que sirvió como guía en el desarrollo del taller, el equipo analizó los puntos críticos identificados en el estado del arte, considerando tanto los impulsores como los retardadores de cambio, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 16. Taller lluvia de ideas para definición de factores de cambio

Puntos Críticos	Factores de Cambio		
	MESA 1	MESA 2	MESA 3
Presión internacional	Dinámicas de mercado – supply, abastecimiento, manufactura de tecnologías por lo que está expuesto a los riesgos de mercado internacional. Emisiones del transporte, el flete juega un % importante en los precios de las tecnologías acá // mercado, nuevas líneas de mercado que se abren (frequency response, desbalance en el sistema)	Agenda 2030, Acuerdo de París, NDCs, seguridad jurídica. Medición en cifras y metas en el tiempo	Desarrollo de competencias para la aplicación energías renovables hay mano de obra calificada para la formulación, trabajar para la operación (desarrollo técnico) Matriz de conocimiento
Recursos naturales abundantes	Afectación del nivel de competencia de los negocios tradicionales	Minerales estratégicos para la transición, economía circular, diversificación de la matriz energética, cadena valor	Integrar la tecnología con la realidad de la zona
Políticas energéticas favorables	Incentivo de nuevos modelos de negocio circulares	Apoyo a proyectos como comunidades energéticas. Examen de lo vigente, monitoreo del avance de la industria en relación con la norma para reaccionar rápido. Articulación gobierno entidades territoriales y planes de desarrollo con consensos nacionales. CONSENSO y uso de la información actualizada.	Cada territorio tiene fortalezas para desarrollar tecnología de acuerdo con sus requerimientos

Puntos Críticos	Factores de Cambio		
	MESA 1	MESA 2	MESA 3
Incentivos gubernamentales	Ampliación a otros sectores diferentes a la oferta de energía	Incentivos Tributarios, tarifa de alimentación garantizadas, contratos de suministro a largo plazo, cargo por confiabilidad, obligaciones de cuota. En la actualidad hay beneficios en lo relativo al IVA y renta; sin embargo, el acceso a estas tecnologías es costoso, siendo posible de pagar solo por estratos socioeconómicos altos; ello podría generar una “regresividad” en la materia tributaria. Límites a los beneficios.	Potencial de Colombia: encontrar modelos de negocios aplicando tecnologías existentes
Avances tecnológicos	Flexibilización regulatoria en permisos, licencias, concesiones ambientales (proceso)	* TRL (Nivel de desarrollo tecnológico) Tecnologías. * BRL (Modelo de negocio). * Infraestructura (Ecosistema).	Comunicación del desarrollo tecnológico para realizar sinergias entre equipos
Concientización ciudadana	Tiempos asociados a los procesos para permisos, licencias y concesiones	Sobre los encargados de cada función, conocer los derechos y deberes de los ciudadanos. Se identificaba como la posibilidad o derecho o deber del ciudadano. Democratización, no solo el prosumidor, sino mejora regulatoria. Revisión de la memoria justificativa de las	Almacenamiento de la energía (desarrollo inverso) para definir cual tecnología es la más apropiada. Costo de almacenamiento.

Puntos Críticos	Factores de Cambio		
	MESA 1	MESA 2	MESA 3
		normas y ser escuchado en su opinión – participación ciudadana-.	
Compromiso del sector empresarial.	Conflicto/violencia que impide el uso de tierras aprovechables para implementación de energías.	Relacionamiento con el Estado y comunidades, incorporación de metas de desarrollo sostenible y los criterios ESG.	Análisis del ciclo de vida de las alternativas energéticas / tecnológicas
Dependencia de los combustibles fósiles	Dificultades en el catastro (no linderos claros) – catastro multipropósito. Estudio de títulos exigido por los bancos. Dificultad para inversores de los predios con potencial y accesibilidad.	Indispensables para garantizar la resiliencia y respaldo del sistema energético.	Transmisión: no hay desarrollo de infraestructura en las zonas con potencial (nuevos horizontes – oportunidad) / bajar uso de combustibles fósiles en zonas de baja conectividad
Insuficiencia de infraestructura	Digitalización (GIS, sistemas para digitalizar temas de tierras que aporte a acceso a predios que facilite accesibilidad a predios potenciales) – capas sociales (no pueden estar cerca de cascos urbanos), ambiental, topográfico.	<ul style="list-style-type: none"> * Hidrógeno (tecnología insuficiente para el transporte) * Problemas con el modelo de costo efectividad de las nuevas tecnologías. * Insuficiencia de las redes de transmisión de la energía eléctrica. * Descentralización de generación de la energía en las ZNI. 	Aprovechar los recursos disponibles/existentes en el área. Llegar a áreas remotas donde también habría un desarrollo social. Innovación enfocada a recursos existentes.
Costos iniciales elevados	Negociaciones entre los actores clave de desarrollo (gobierno, entidades territoriales, comunidad).	No solo son los costos iniciales, sino los costos de operación y mantenimiento. El modelo financiero debe encajar perfectamente para que sea rentable.	<p>Economía del CO2 responsable de innovación.</p> <p>Políticas de captura</p> <p>Analizar carbono intensidad de los</p>

Puntos Críticos	Factores de Cambio		
	MESA 1	MESA 2	MESA 3
		Aumento de las tasas de interés. La apertura a canales de financiación accesibles es importante, pues viabilizan los proyectos.	procesos (desarrollo que mas va a impactar) manejo de los recursos de acuerdo con las necesidades energéticas y de las comunidades y su calidad de vida
Influencia de la industria tradicional	Comunidades energéticas para descentralización.	Falta incluir el Rol del Estado (emprendedor). Compromiso de la industria. Trabajo en conjunto	Desarrollo de tecnologías en sinergia con universidades / industria / gobierno
Desafíos geográficos	Productos como servicios.	Transporte, transmisión, seguridad, aspectos ambientales, licencias, permisos y reservas.	Costos de implementación de las tecnologías: en que invertir, sistemas escalados
Posición de las comunidades	Posición comunidades – consultas, comunidades asentadas que exigen ser consultadas (consultas previas costo adicional y demora).	Consultas Previas, choque intercultural, paisaje, indemnización, justicia, pobreza energética, igualdad, industrialización de las comunidades, comunidades energéticas, NIMBI.	Interrelaciones tecnológicas: cuando, como del cambio tecnológico ejemplo: movilidad eléctrica, qué requiere para que ocurra.
Otros	Nuevos modelos de negocio o casos de uso de tecnologías.	Rol de estado.	Se requiere marco jurídico de acuerdo con los cambios tecnológicos.
Otros	Factores de seguridad ligados a las tecnologías.	Conocimiento compartido / información.	Baja interoperabilidad: falta claridad en cada eslabón de la cadena (normatividad) / desconexión entre la data de oferta,

Puntos Críticos	Factores de Cambio		
	MESA 1	MESA 2	MESA 3
			demanda, recursos / data privada decisiones conjuntas multisectoriales Flexibilidad en los sistemas para aplicar opciones de acuerdo con los cambios climáticos y geográficos
Otros	Paradigmas en torno a determinadas energías (pej. Nuclear).	Transición para qué y por qué.	Comunidades energéticas abierta a diferentes tecnologías – evaluar beneficio, requerimiento, carbono intensidad.
Otros	Uso intensivo de recursos (agua, suelos que pueden ser aprovechables para temas agricultura).	Revisar portafolio energético, asequible en costo y baja carbono intensidad.	Cambio climático: generar energía sin intervenir las reservas forestales.
Otros	Pertinencia de la implementación de estas tecnologías y acciones (realidad de Colombia frente a los otros países).	Energía gravitacional – aprovechas activos que actualmente son pasivos / mínimo impacto ambiental.	Potencial de Colombia: 1. Las zonas costeras con racionamiento de agua (tecnología de desalinización) 2. Almacenamiento de energía: hidroeléctricas reversibles 3. Reforestación
Otros	Límites económicamente viables (quemadas, cambio parque automotor, ejemplo Inglaterra).	País agro: sinergia entre el cultivo y la generación solar.	En la cadena de valor de la energía faltan herramientas para las personas del campo.

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de la consolidación y análisis de factores de la lluvia de ideas realizada durante el segundo taller con expertos, se definieron y seleccionaron veintitrés (23) factores de cambio, teniendo como premisas que sean: medibles, precisos, neutrales, causales, realistas y modificables. Estos factores también fueron clasificados según su familia temática por factores Políticos, Económicos, Sociales, Tecnológicos, Ecológicos o Ambientales y Legales (PESTEL), como se muestra en la siguiente figura:

Figura 55. Factores de cambio clasificados en matriz PESTEL



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta un detalle de los factores de cambio con su respectiva definición y estado actual en Colombia.

Tabla 17. Definición de factores de cambio

Ámbito	Factor de Cambio	Definición	Estado actual
Político	Políticas Energéticas	La implementación de políticas gubernamentales que promuevan la transición hacia energías renovables, proporcionando incentivos y regulaciones favorables. Medible por el número de políticas implementadas y su efectividad en el crecimiento del sector renovable.	Existen políticas como la Ley 2099 de 2021 (Transición Energética) y la Estrategia Climática de Largo Plazo (E2050), aún está en proceso de implementación.
Político	Incentivos Gubernamentales	El apoyo financiero y fiscal del gobierno para proyectos de energía renovable, como subsidios y exenciones fiscales, que fomentan la inversión en tecnologías limpias. Medible por el monto de los incentivos y el incremento en proyectos de energía renovable.	EL gobierno ha otorgado exenciones de IVA y aranceles para tecnologías limpias. Sin embargo, el acceso a estos beneficios sigue siendo limitado por trámites complejos y barreras administrativas.
Tecnológico	Innovación Tecnológica	La evolución y adopción de nuevas tecnologías en el sector energético, como la energía solar, eólica y almacenamiento avanzado. Medible por la cantidad de patentes registradas y la eficiencia de las nuevas tecnologías.	Colombia avanza en la adopción de tecnologías solares y eólicas, pero aún depende en gran medida de la importación de tecnologías. Sin embargo, es una oportunidad y un desafío para investigación y desarrollo local.
Social	Concientización Ciudadana	La creciente sensibilización de la población sobre la importancia de la sostenibilidad y el impacto ambiental, influenciando su comportamiento de consumo. Medible a través de encuestas de opinión y cambios en patrones de consumo.	En el informe de Avance Anual ODS 2023 se destaca avances significativos en Colombia en la implementación de los ODS, especialmente en áreas como la protección del medio ambiente. Sin embargo, también señala desafíos persistentes en la lucha contra la deforestación y la mejora de la calidad del agua y del aire. Se

Ámbito	Factor de Cambio	Definición	Estado actual
			resalta la importancia de fortalecer las políticas públicas y la inversión en áreas críticas para avanzar hacia un desarrollo sostenible y equitativo.
Social	Compromiso del Sector Empresarial	El grado de compromiso de las empresas con prácticas sostenibles y responsabilidad social corporativa. Medible por la cantidad de empresas que adoptan políticas de sostenibilidad y reportan su impacto ambiental	De acuerdo con el reporte DJSI las empresas colombianas tiene una participación del 16% con respecto a Latinoamérica.
Tecnológico	Expansión y modernización de la Infraestructura Energética	La expansión y modernización de la infraestructura necesaria para soportar nuevas tecnologías de energía renovable. Medible por la cantidad de infraestructura instalada y su capacidad operativa.	Existen proyectos de infraestructura para transmisión eléctrica, pero con restricciones en zonas rurales y aisladas.
Económico	Costos de inversión y O&M	La disminución de los costos de instalación y operación de tecnologías de energía renovable. Medible por el costo promedio de instalación y la reducción en los costos operativos.	Los costos de tecnologías renovables, como solar y eólica, han disminuido significativamente.
Social	Influencia de la Industria Tradicional	El impacto de las industrias tradicionales en la adopción de nuevas tecnologías energéticas, incluyendo resistencia al cambio. Medible por la cantidad de iniciativas de transición y la oposición de sectores tradicionales.	Las industrias tradicionales de combustibles fósiles ejercen una fuerte influencia, resistiendo cambios hacia energías renovables debido a intereses económicos y laborales.
Social	Posición de las Comunidades	La aceptación y participación de las comunidades locales en proyectos de energía renovable, bien sea por dinámicas culturales y/o percepción o paradigmas frente	La aceptación comunitaria varía según la región y el tipo de proyecto, con muchas iniciativas

Ámbito	Factor de Cambio	Definición	Estado actual
		al tipo de energía a implementar. Medible por la cantidad de consultas comunitarias exitosas y la participación en proyectos locales	enfrentando oposición debido a conflictos sociales o falta de consulta previa adecuada.
Económico	Nuevos Modelos de Negocio Circulares	La generación de modelos de negocio de acuerdo con las tipologías de iniciativas innovadoras de la economía circular, como modelos de valoración de residuos, circulares (reúso, reutilización, reciclaje), extensión de vida útil (rediseño de productos y procesos), productos como servicios entre otros. Medible por la cantidad de modelos de negocio circulares implementados y su impacto económico.	Los modelos de negocio circulares comienzan a adoptarse en diferentes sectores, pero no están ampliamente integrados en el sector energético.
Legal	Flexibilización Regulatoria	La simplificación de procesos regulatorios para facilitar la implementación de proyectos de energía renovable. Medible por la reducción en los tiempos de permisos y licencias.	Se han simplificado algunos procesos regulatorios a través de la política de mejora regulatoria en Colombia.
Social	Tiempos en Procesos Administrativos	La eficiencia en la tramitación de permisos y licencias para proyectos energéticos. Medible por la reducción en los tiempos administrativos y el aumento en la cantidad de proyectos aprobados.	Según el Decreto 1076 de 2015, la autoridad ambiental cuenta con un plazo máximo de 90 días hábiles para evaluar una solicitud de licencia ambiental. Este periodo puede ser prorrogado si se requiere información adicional por parte del solicitante. En proyectos simples, el proceso completo puede tomar entre 6 y 9 meses.

Ámbito	Factor de Cambio	Definición	Estado actual
			Para proyectos complejos o que requieran consulta previa con comunidades indígenas o afrodescendientes, este tiempo puede extenderse a más de 12 meses.
Social	Mitigación de Conflictos y Violencia	La reducción de conflictos y violencia en áreas aptas para proyectos de energía renovable. Medible por la cantidad de áreas seguras disponibles para proyectos.	En algunas zonas, la violencia y los conflictos limitan la implementación de proyectos energéticos, especialmente en áreas con presencia de grupos armados.
Legal	Regulación, equidad y normalización en el Catastro	La clarificación de linderos y la digitalización del catastro para facilitar inversiones en predios con potencial energético. Medible por la cantidad de predios regularizados y la eficiencia en el proceso de inversión.	De acuerdo con el IGAC, la meta establecida en 2023 es actualizar catastralmente 660 municipios. La mayoría de estos deben completar sus procesos entre 2024 y 2025.
Social	Negociaciones entre Actores Clave	La colaboración y acuerdos entre gobierno, entidades territoriales y comunidades para proyectos energéticos. Medible por la cantidad de acuerdos alcanzados y proyectos exitosamente implementados.	La asociación de Energías Renovables SER, cuenta con una estrategia de relacionamiento y posicionamiento estratégico de las energías renovables en el entorno social y de la opinión pública local, regional y nacional con el propósito de tener una participación activa en el desarrollo de políticas públicas y relacionamiento con las comunidades.
Social	Formación de Comunidades Energéticas	El desarrollo de comunidades que generan y gestionan su propia energía. Medible por la cantidad de comunidades energéticas establecidas y su autosuficiencia energética.	En agosto de 2024, el Ministerio y FENOGE confirmaron la ejecución de varios proyectos para comunidades energéticas que se

Ámbito	Factor de Cambio	Definición	Estado actual
			desarrollarán en áreas rurales y zonas no interconectadas. Estas iniciativas tendrán un enfoque en la energía solar y eólica, buscando aprovechar las condiciones geográficas y climáticas de cada región. Lo anterior soportado en el Decreto 2236 del 2023.
Tecnológico	Seguridad en Tecnologías de Energía	La implementación de medidas de seguridad para tecnologías energéticas. Medible por la cantidad de incidentes de seguridad y la implementación de medidas preventivas.	Las normativas de seguridad energética están en desarrollo. Hay desafíos en la protección de infraestructura crítica y en la ciberseguridad de sistemas interconectados.
Ambiental	Requerimiento de recursos naturales	La gestión eficiente de recursos intensivos como agua y suelos en proyectos energéticos. Medible por la reducción en el uso de recursos y la sostenibilidad de los proyectos.	Para el manejo del agua se cuenta con proyectos de recolección de agua lluvia, desalinización, proyectos de reforestación y gestión del agua, riego sostenible, entre otros.
Ambiental	Huella de carbono	Huella de carbono o cantidad de emisiones de CO ₂ e asociadas a la implementación y desarrollo de proyectos. Medible por la cantidad de proyectos de captura de carbono y la reducción en emisiones.	Para el año 2018 se emitieron 302.9 MtonCO ₂ eq y que la meta del país es reducir el 51 % las emisiones de GEI al 2030 y alcanzar la carbononeutralidad al 2050.
Social	Sinergia en el Desarrollo Tecnológico local	La colaboración de los actores universidades, industria y gobierno para el desarrollo de tecnologías energéticas locales. Medible por la cantidad de proyectos colaborativos y su impacto en el sector.	La universidad Nacional cuenta con el programa Energética 2030 que además en el desarrollo de diferentes proyectos se asocia con otras instituciones y entidades para el desarrollo

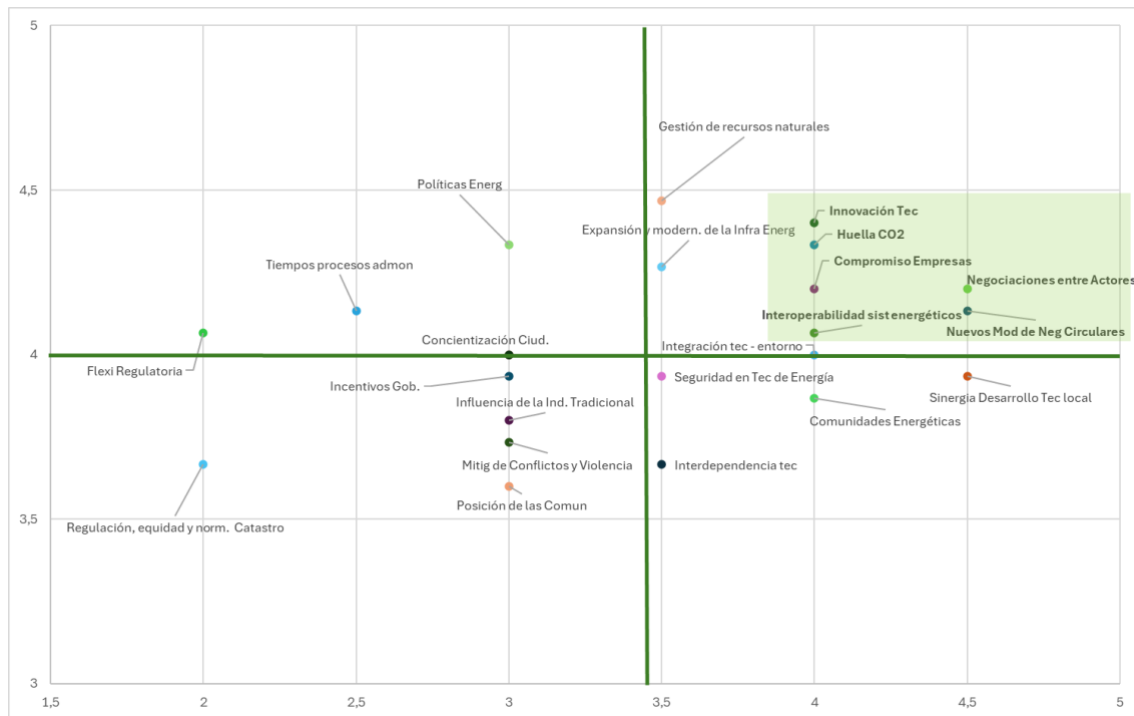
Ámbito	Factor de Cambio	Definición	Estado actual
			de la investigación en torno a la transición energética.
Tecnológico	Interdependencia tecnológica	La capacidad para generar tecnología propia y poseer infraestructura que a mediano plazo funcione de manera independiente, a pesar de requerir recursos externos.	Aunque aún hay alta dependencia alta de tecnología importada. Ecopetrol a través de Econova en 2024 realizó dos convocatorias que incentivan el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadores para la transición energética.
Tecnológico	Interoperabilidad de los sistemas energéticos	La coordinación de diferentes tecnologías energéticas para maximizar su efectividad. Medible por la integración tecnológica y el rendimiento de sistemas combinados.	A Colombia le aprobaron un plan de inversiones para la integración de Energías Renovables (REI) por US\$ 70 millones apoyado por el BID.
Tecnológico	Integración tecnología – entorno	Articulación tecnológica de acuerdo con la necesidad o realidad y potencial de la zona para asegurar la sostenibilidad en el tiempo de los proyectos.	En 2024 se instaló la Mesa de Transición Energética Justa para apalancar proyectos e iniciativas para ampliar la generación de energía a partir de fuentes no convencionales de energía renovable.

Fuente: Elaboración propia

5.2 Variables estratégicas

Para la definición de las variables estratégicas sobre las cuales se desarrollarán las percepciones de futuro, se realizó un tercer taller con expertos con el fin de validar y priorizar los factores de cambio seleccionados, empleando nuevamente una matriz IGO (Importancia y Gobernabilidad), dando como resultado lo plasmado en la Figura 56.

Figura 56. Priorización de factores de cambio mediante matriz IGO



Fuente: Elaboración propia

Como resultado, se obtuvieron las siguientes seis (6) variables estratégicas:

Tabla 18. Variables estratégicas

Variable estratégica	Familia
Negociaciones entre actores clave	Social
Compromiso del sector empresarial	Social
Innovación tecnológica	Tecnológico
Interoperabilidad de los sistemas energéticos	Tecnológico
Nuevos modelos de negocio circulares	Económico
Huella de carbono	Ambiental

Fuente: Elaboración propia

5.2.1 Sintaxis lógica

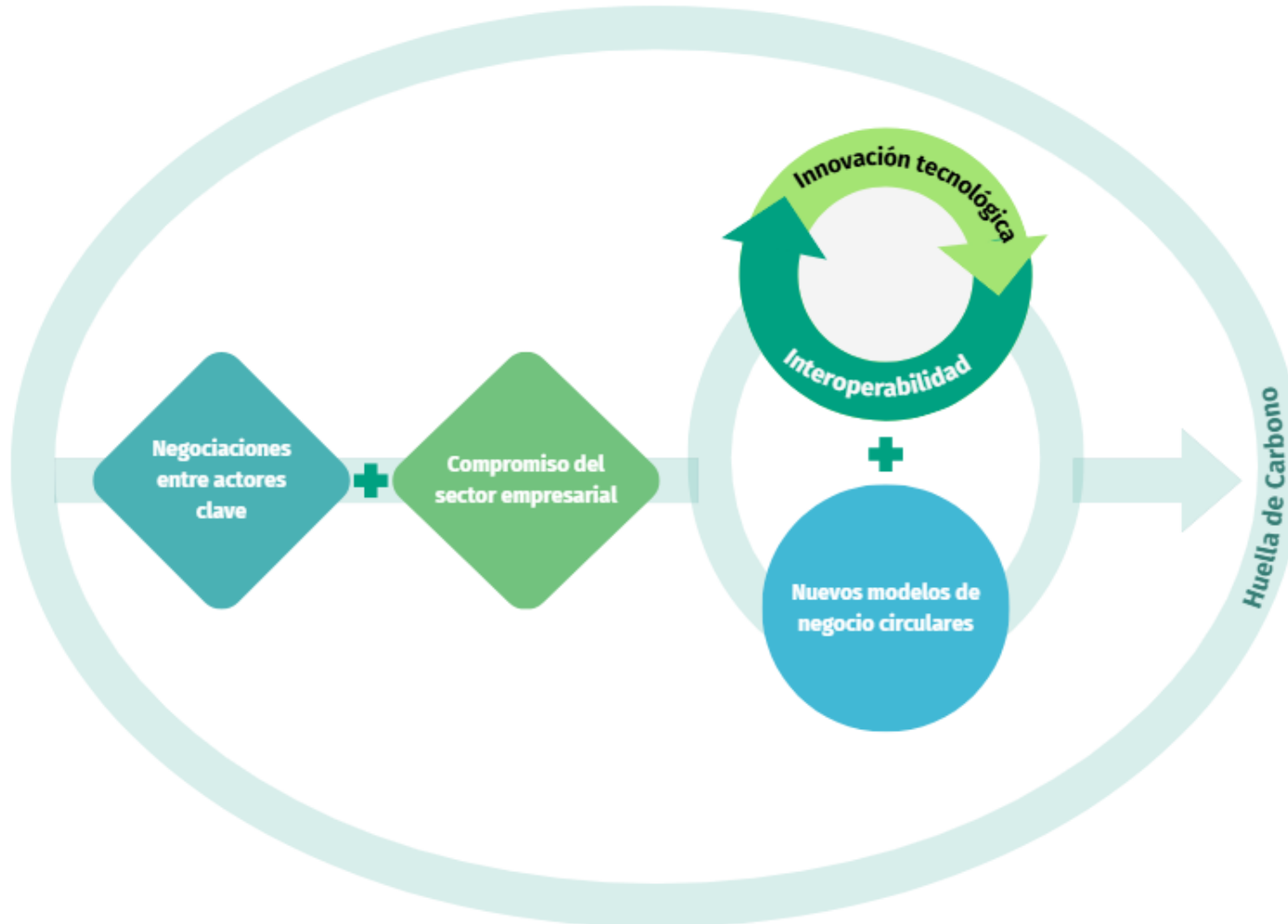
Con el fin de generar una narrativa que facilite el entendimiento de la relación entre las variables estratégicas seleccionadas en un contexto coherente que denote futuro para la transición energética en Colombia, se realizó la sintaxis lógica presentada a continuación y resumida en la Figura 57:

*“En el camino hacia la transición energética en Colombia al 2040, destaca el rol que juegan factores como **las negociaciones entre actores clave** para alcanzar el consenso y la coordinación efectiva entre los sectores público, privado y las comunidades, así como **el compromiso del sector empresarial** con la adopción de prácticas sostenibles y la responsabilidad social corporativa.*

*Estas sinergias y trabajo mancomunado permiten fomentar: (i) **la innovación tecnológica** en el país, facilitando la evolución y adopción de nuevas tecnologías en el sector energético, como la energía solar, eólica, almacenamiento avanzado, entre otros, lo cual a su vez requiere de considerar como elemento clave **la interoperabilidad de los sistemas energéticos** para lograr una integración e interacción eficiente de las diferentes fuentes de energía. Estos factores se potencian mutuamente, considerando que una mayor innovación facilita que estas tecnologías sean interoperables desde su diseño, a la vez que la interoperabilidad actúa como catalizador para la innovación, generando un entorno en el que las nuevas tecnologías sean fácilmente adoptadas; (ii) la creación de **nuevos modelos de negocio circulares** que transforman las cadenas de valor en cadenas sostenibles, optimizando el uso de recursos, valorizando residuos, extendiendo la vida útil de productos mediante su rediseño, y fomentando el uso de productos como servicios.*

*De manera transversal e integradora a estos esfuerzos colaborativos, resalta la importancia de adoptar acciones que generen impactos positivos en la **huella de carbono** de Colombia, en pro de asegurar un sistema energético bajo en emisiones de gases de efecto invernadero, en línea con los compromisos nacionales y globales, y resiliente, considerando la vulnerabilidad del país frente al cambio climático.”*

Figura 57. Sintaxis Lógica



Fuente: Elaboración propia

Capítulo 6. Juego de Actores

Godet definió el juego de actores como el proceso de identificar y analizar a los principales actores que pueden influir en, o verse afectados por, un problema o tema específico. Por su parte, Bourse profundizó en la relación entre la intensidad de su poder y autonomía. En conjunto, ambos autores, en el desarrollo de la metodología soportada en la herramienta MACTOR, buscaban entender cómo los actores, con distintos intereses, poderes y objetivos, interactúan entre sí y cómo estas interacciones pueden moldear los futuros posibles. Por lo anterior, el juego de actores permite identificar las alianzas, los conflictos y las posiciones estratégicas que cada actor puede asumir para alcanzar sus objetivos. [Metodos de prospectiva > Los programas > Mactor : La prospective](#)

6.1 Definición de actores

Como primer paso se definen los actores que tienen un rol importante dentro de la transición energética en Colombia, identificando en este caso los doce (12) actores principales mencionados a continuación y de los cuales se amplía información en la Tabla 19.

- Gobierno
- Entidades regulatorias
- Ecopetrol
- Generadores de energía renovable
- Operadores de red
- Empresas tradicionales
- Organizaciones no gubernamentales (ONG's)
- Comunidades locales
- Sector financiero
- Academia
- Usuarios finales
- Medios de comunicación

Tabla 19. Definición de actores

No.	Actor	Abreviación	Descripción
1	Gobierno	GOB	Se refiere al poder ejecutivo en su conjunto con capacidad para establecer políticas y estrategias que incluye al presidente, vicepresidentes, y los ministerios que desarrollan y ejecutan las directrices generales, objetivos estratégicos y políticas públicas. Por ejemplo, el Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación son actores clave en la formulación de políticas y estrategias de transición energética.
2	Entidades regulatorias	REG	Tienen un rol especializado y autónomo en la supervisión, regulación y control de la implementación de políticas y el comportamiento del sector energético, asegurando el cumplimiento de normas y estándares técnicos, como la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), Superintendencia de Servicios Públicos (SSPD), etc.
3	Ecopetrol	ECP	La empresa de petróleo y gas más grande de Colombia y una de las más importantes en el sector energético nacional. Aunque históricamente se ha enfocado en hidrocarburos, ha comenzado a diversificar hacia energías renovables y proyectos de hidrógeno verde como parte de su estrategia de descarbonización.
4	Generadores de energía renovable	GREN	Son los encargados de producir la energía por medio de centrales hidráulicas, solares y eólicas.
5	Operadores de red	OR	Encargados de la planeación de la expansión y de las inversiones, operación y mantenimiento de los sistemas de transmisión y distribución.
6	Empresas tradicionales	ETR	Industrias que demandan grandes cantidades de energía para sus operaciones, como la minería, el cemento, el acero y el sector químico. Estas empresas enfrentan desafíos en la transición energética debido a sus altos costos de cambio a fuentes renovables y su dependencia en procesos energéticamente intensivos. Son empresas que no tienen interés en adaptarse a los compromisos del país en pro de la transición energética.
7	Organizaciones No Gubernamentales	ONG	Entidades independientes sin fines de lucro que promueven causas sociales y ambientales. En la transición energética, las ONGs juegan un papel importante al presionar por políticas sostenibles, proteger a las comunidades afectadas y monitorear el cumplimiento de los compromisos ambientales.

8	Comunidades locales	COM	Grupos de personas que habitan en zonas afectadas por proyectos energéticos o extractivos, como áreas rurales y regiones productoras de hidrocarburos. Las comunidades son actores clave en la transición, ya que sus necesidades y preocupaciones deben ser integradas para lograr una transición justa y sostenible.
9	Sector financiero	FINC	Conjunto de instituciones como bancos, inversionistas y fondos de inversión que financian proyectos y empresas. Su participación es fundamental en la transición energética, ya que el financiamiento y la inversión en energías limpias son esenciales para la implementación de tecnologías sostenibles.
10	Academia	ACDM	Instituciones educativas y de investigación que generan conocimientos y desarrollan tecnologías para la transición energética. La academia contribuye a la innovación, formación de talento y estudios que orientan la creación de políticas basadas en evidencia científica.
11	Usuarios finales	UF	Persona natural o jurídica que se beneficia con la prestación de un servicio público, bien como propietario del inmueble en donde este se presta, o como receptor directo del servicio. A este último usuario se le denomina también consumidor.
12	Medios de comunicación	COMN	Canales de difusión de información (prensa, televisión, radio, internet) que influyen en la opinión pública y pueden educar a la sociedad sobre los beneficios de la transición energética. Los medios también monitorean y reportan los avances y retos, promoviendo transparencia y rendición de cuentas en los actores involucrados.

Fuente: Elaboración propia

6.2 Retos y objetivos

Después de definir los actores principales, se describen los retos estratégicos sobre los cuales los actores tienen objetivos convergentes o divergentes relacionados con las variables estratégicas previamente elegidas.

Tabla 20. Retos y Objetivos

Variable estratégica	Reto	Objetivos	Abreviatura
Negociaciones entre actores clave	Lograr consenso y coordinación efectiva entre los actores clave del sector energético para la transición energética en Colombia.	Fomentar el diálogo continuo entre los diferentes actores clave para mitigar conflictos y habilitar nuevas oportunidades.	DIALG
		Incentivar la cooperación para viabilizar y asegurar una adecuada implementación, inversión e innovación de proyectos.	COOP
Compromiso del sector empresarial	Alinear los intereses del sector empresarial con los objetivos de sostenibilidad y la transición hacia energías limpias.	Incentivar la inversión del sector privado en tecnologías de energía renovable.	INV
		Desarrollar lineamientos para la implementación y el cumplimiento de las metas a nivel país.	LIN
Interoperabilidad entre los sistemas energéticos	Garantizar un mayor nivel de interoperabilidad del sistema energético.	Fomentar la digitalización y el uso de tecnologías inteligentes que mejoren la capacidad de adaptación y flexibilidad del sistema energético.	DIGI
		Implementar un sistema de respuesta a la demanda que integre generación distribuida y almacenamiento energético en los diferentes sectores.	GDEM
Innovación tecnológica	Acelerar el desarrollo y la implementación de tecnologías innovadoras para la generación y almacenamiento de energía limpia.	Masificar la transferencia de tecnología desde mercados internacionales hacia Colombia.	MASTEC
		Desarrollar interdependencia tecnológica para mitigar impactos de factores externos y crear sinergias tecnológicas.	INTEC
Nuevos modelos de negocios circulares	Fomentar la adopción de modelos de negocio circulares en el sector energético que optimicen los recursos.	Masificar el uso de productos como servicios.	PCS
		Anticipar y gestionar de manera sostenible el ciclo de vida de los componentes de sistemas energéticos.	CVRES

Huella de Carbono	Cumplir con los compromisos del país en términos de reducción de emisiones de GEI.	Adaptarse y mitigar la vulnerabilidad del país frente al cambio climático, que permita obtener beneficios locales en mejora en la calidad del aire y salud pública, reducción de contaminantes, temperatura urbana y lluvias ácidas.	VULN
		Posicionar al país como un destino atractivo para el acceso a recursos financieros internacionales.	DESA

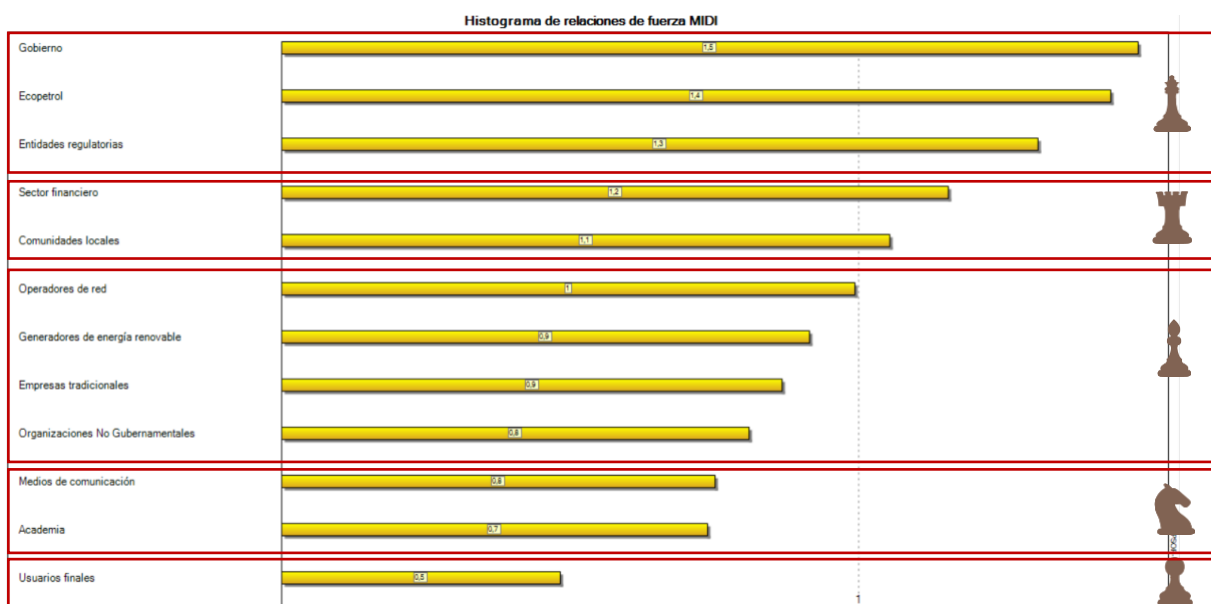
Fuente: Elaboración propia

6.3 Estimación de poderes de actores

Luego, a través de una matriz de influencia directa (MID), en el software MACTOR se evalúa la capacidad de un actor para afectar a otro en una escala de 0 a 4, donde 4 representa una influencia fuerte, 3 y 2 representan una influencia moderada, 1 una influencia débil y 0 una influencia nula, permitiendo identificar quiénes son los actores más influyentes y quiénes son más dependientes dentro del sistema.


En el siguiente histograma se puede observar el poder de cada actor de acuerdo con su R_i (vector de relación de fuerza) donde los actores con R_i mayor a 1 representan los actores con poder de doblegar la voluntad de los otros destacándose el gobierno, las entidades regulatorias y Ecopetrol como los actores principales de poder.





Figura 58. Histograma de fuerza de actores



Fuente: Elaboración propia mediante MACTOR

Tabla 21. Clasificación de los actores

Clasificación	Actores	Justificación
Reinas 	GOB (Gobierno), REG (Reguladores), ECP (Ecopetrol)	Alta influencia y autonomía sobre todos los demás actores, con capacidad de establecer políticas, normativas y prioridades clave.

Torres 	FINC (Sector Financiero), COM (Comunidades Locales)	Influencia estratégica. FINC moviliza recursos esenciales, mientras que COM asegura la aceptación social de proyectos energéticos.
Alfiles 	GREN (Empresas de Energías Renovables), OR (Operadores de Redes), ETR (Empresas Tradicionales), ONG (Organizaciones No Gubernamentales)	Especialización técnica, operativa o social, con influencia significativa en áreas específicas como sostenibilidad y transición.
Caballos 	ACDM (Academia), COMN (Medios de Comunicación)	Influencia indirecta. La academia provee conocimiento técnico y científico, mientras que los medios amplifican las demandas sociales.
Peones 	UF (Usuarios Finales)	Poco poder individual, pero su influencia colectiva puede presionar a los actores de mayor jerarquía.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta gráficamente cada uno de los actores y su influencia representada en el valor de las fichas de ajedrez.

Figura 59. Representación Actores



Fuente: Elaboración propia

6.4 Relación entre los actores y los objetivos

Para el análisis de relaciones entre actores y objetivos, en el software MACTOR se evaluó cómo cada actor se posiciona frente a los objetivos estratégicos planteados. Este enfoque permite identificar si los actores apoyan, rechazan o son neutrales respecto a cada objetivo, proporcionando una visión clara de sus intereses y posibles motivaciones. Los valores positivos representan la movilización de los actores en la consecución de los objetivos, mientras que los valores negativos representan la tasa de oposición.

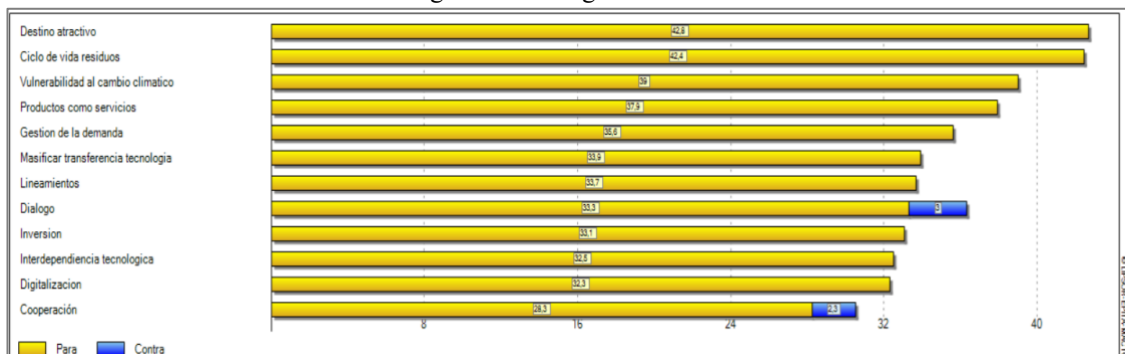
Tabla 22. Matriz 3MAO (Matriz actores sobre objetivos orden 3 - ponderada).

3MAO	DIALOG	COOP	INV	LIN	DIGI	GDEM	MASTEC	INTEC	PCS	CVRES	VULN	DESA	Mobilización
GOB	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	73,9
REG	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	63,8
ECP	5,8	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	5,8	4,4	5,8	5,8	5,8	5,8	61,1
GREN	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	2,7	3,6	3,6	3,6	3,6	42,8
OR	3,0	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0	2,0	2,0	4,0	3,0	2,0	3,0	34,9
ETR	-3,0	-2,3	0,0	0,0	1,5	1,5	0,0	1,5	1,5	2,3	1,5	1,5	16,7
ONG	1,4	1,4	1,4	1,4	0,0	1,4	1,4	0,0	1,4	2,1	2,8	2,8	17,6
COM	1,7	0,0	1,7	1,7	0,0	1,7	1,7	0,0	1,7	2,5	1,7	2,5	17,0
FINC	3,6	3,6	4,8	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	4,8	2,4	4,8	45,9
ACDM	2,7	1,8	2,7	1,8	2,7	1,8	2,7	3,6	2,7	2,7	3,6	3,6	32,1
UF	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	2,1	1,6	1,6	2,1	1,6	1,6	1,0	13,5
COMN	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	2,5	2,5	2,5	10,8
Número de acuerdos	33,3	28,3	33,1	33,7	32,3	35,6	33,9	32,5	37,9	42,4	39,0	42,8	
Número de desacuerdos	-3,0	-2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Grado de movilización	36,4	30,6	33,1	33,7	32,3	35,6	33,9	32,5	37,9	42,4	39,0	42,8	

Fuente: Elaboración propia mediante MACTOR

De manera gráfica, en el siguiente histograma se observa la movilización (capacidad para ejecutar) de los actores sobre cada uno los objetivos, priorizando objetivos como: Posicionar al país como un destino atractivo para el acceso a recursos financieros internacionales, ciclo de vida de residuos, vulnerabilidad al cambio climático, implementación de productos como servicios.

Figura 60. Histograma 3MAO



Fuente: Elaboración propia mediante MACTOR

6.5 Estrategias de los actores para defender sus intereses

Con el fin de visualizar y anticipar las posibles interacciones o “jugadas” entre los actores para influir en el avance de la transición energética en el país, se generaron tres (3) espacios estratégicos o “campos de Batalla” presentados a continuación.

6.5.1 Campo de batalla “Capoteando las balas”

En el primer campo de batalla a pesar de los esfuerzos de las empresas tradicionales apoyados por los medios de comunicación, el gobierno soportado por las ONGs y el sector financiero, logran ganar la batalla implementando incentivos para las empresas que ejecuten proyectos alineados con los compromisos nacionales y globales.

Figura 61. Campo de batalla No. 1. Capoteando las balas.



Fuente: Elaboración propia

6.5.2 Campo de batalla “No hay enemigo pequeño”

En este campo de batalla, las empresas de energías renovables para ganar adeptos prometen beneficios a las comunidades que no pueden cumplir, las ONGs denuncian estas irregularidades y las comunidades realizan protestas para llamar la atención del estado hasta bloquear la ejecución de los proyectos y ganar la batalla. Sin embargo, surge una oportunidad de negociación con el estado como garante del proceso y se da el último campo de batalla.

Figura 62. Campo de batalla No. 2. No hay enemigo pequeño



Fuente: Elaboración propia

6.5.3 Campo de batalla "No hay enemigo pequeño Round 2"

Después que los proyectos se acogieran a las nuevas exigencias del gobierno y a la veeduría de las ONGs, las comunidades participan activamente de los proyectos y el gobierno puede declararse ganador de la batalla.

Figura 63. Campo de batalla No. 3. Round 2



Fuente: Elaboración propia

Capítulo 7. Escenarios de Futuro

En este punto converge toda la información recopilada previamente, especialmente las ideas obtenidas de las tendencias y mejores prácticas a nivel mundial. En capítulos anteriores fue posible evidenciar que factores clave como las diferentes tecnologías y su innovación, la regulación, la integración de energías renovables y el papel de los distintos actores del sector determinarán el camino que seguirá el país en las próximas décadas.

El análisis de escenarios es una herramienta esencial para afrontar la incertidumbre, la cual no busca predecir el futuro sino identificar y evaluar posibles trayectorias que podrían materializarse a partir de la interacción de múltiples variables estratégicas. Mediante este ejercicio, es posible visualizar cómo pueden evolucionar dichos factores clave identificados y ofrecer una visión estructurada del futuro, permitiendo así diseñar estrategias adaptativas y brindar mayores insumos para la toma de decisiones informadas en el diseño de políticas públicas, estrategias empresariales e inversiones en el sector energético.

El diseño del futuro se materializa a través de la construcción de escenarios, para lo cual es recomendable utilizar herramientas como: el análisis morfológico, el sistema de matriz de impacto cruzado (SMIC) y la metodología de la cruz de escenarios o ejes de Peter Schwartz. Estas metodologías permiten proyectarnos hacia el futuro, situarnos en el futuro deseado y, desde esa perspectiva, trazar el camino de regreso hasta el presente, con el fin de identificar las decisiones, estrategias y acciones necesarias para alcanzarlo.

En este capítulo se diseña y explora los escenarios posibles y probables que ilustran diferentes caminos en los que la transición energética en Colombia podría desarrollarse, empleando como herramientas el análisis morfológico y el sistema de matriz de impacto cruzado (SMIC). Así mismo, se incluye un “plan vigía” con el fin de monitorear las variables estratégicas que en cada escenario presentan riesgo de no cumplirse, analizando su causa y posibles consecuencias para anticipar cambios en el entorno e impactos que puedan influir en el objetivo deseado y tomar decisiones correctivas de manera oportuna.

7.1 Análisis morfológico

El análisis morfológico es una herramienta que tiende a explorar de manera sistemática los futuros posibles, los cuales hacen parte del reino de la conjetura, a partir del estudio de todas las combinaciones resultantes de la descomposición de un sistema.

Su objetivo es evidenciar “la conducta de los nuevos productos en previsión tecnológica, pero también la construcción de escenarios”, es decir, se utiliza para la construcción de “escenarios” caracterizados por identificar estados posibles de cada variable, denominados “hipótesis”. Este se compone de dos fases consecutivas:

- Construcción del espacio morfológico, es decir, la descomposición del sistema en subsistemas o componentes);
- Reducción del espacio morfológico, mediante la introducción de criterios de exclusión o criterios de selección.

De esta manera, se identifica un número manejable de escenarios posibles, de los cuales posteriormente se selecciona uno o varios considerados “apuesta”, ya que representan el futuro por el cual apuesta la organización, en este caso, el país, y sobre el cual se decide orientar los esfuerzos.

7.1.1 Construcción del espacio morfológico

En primer lugar, se diseñaron tres tipos de opciones o “hipótesis” posibles al 2040 (moderada, alta y muy alta) para cada una de las variables estratégicas seleccionadas, en función del reto que implica su logro para el país. Durante el planteamiento de estas hipótesis, se tuvo en cuenta el estado actual o medición disponible para cada variable estratégica, con base en lo investigado en los capítulos anteriores y evidenciado en los resúmenes presentados en las Tablas 17 y 24.

A continuación, en la Tabla 23 se detallan las hipótesis planteadas para cada variable estratégica:

Tabla 23. Espacio morfológico con hipótesis de futuro

Variable Estratégica	Hipótesis Moderada	Hipótesis Alta	Hipótesis Muy Alta
Negociaciones entre Actores Clave	Colombia consolida alianzas estratégicas internacionales en foros multilaterales y fortaleciendo compromisos climáticos. A nivel nacional, la articulación entre el gobierno, el sector privado y la sociedad civil sigue siendo desigual, con procesos de concertación fragmentados y falta de coordinación en la implementación de políticas. Las sinergias se concentran en sectores específicos , como las empresas energéticas y no constituyen un marco financiero amplio que facilite la participación de todos los actores empresariales, por lo que persisten desafíos en la inclusión de pequeños actores .	Colombia trasciende más allá de la consolidación de sus alianzas internacionales actuales, estableciendo un sistema de gobernanza energética que articula sinergias internacionales y nacionales . Se trabaja con mayor dinamismo en la inclusión de actores pequeños y medianos , mediante beneficios como tasas preferenciales , tanto para personas y empresas, incentivando proyectos de energías renovables y premiando el cumplimiento de metas de sostenibilidad y transición energética. Se promueve una descentralización efectiva que democratiza el acceso a tecnologías limpias y a recursos financieros en el país.	Posicionamiento de Colombia como un líder global en transición energética, exportando tecnologías limpias y modelos de gobernanza climática, siendo un referente internacional, compartiendo su experiencia, marcos regulatorios, buenas prácticas y enfoques innovadores con otros países o regiones. Se logra una articulación total entre actores nacionales e internacionales, grandes, medianas y pequeñas empresas, impulsada por un ecosistema inclusivo que combina innovación tecnológica, financiamiento masivo y gobernanza descentralizada .
Compromiso del Sector Empresarial	El compromiso empresarial con la transición energética y sostenibilidad crece moderadamente, liderado por grandes empresas con presencia internacional que adoptan estándares ESG para fortalecer su competitividad y atraer inversión extranjera.	El sector empresarial en Colombia avanza hacia una transición energética más amplia y equitativa mediante una estrategia estructurada, con grandes empresas liderando la innovación tecnológica en energías limpias y PYMES integrándose progresivamente gracias a mecanismos financieros	El sector empresarial colombiano lidera una transformación integral hacia la sostenibilidad, en donde la implementación de tecnologías limpias y prácticas ESG se convierte en el eje central de competitividad del país. Las PYMES no solo adoptan

Variable Estratégica	Hipótesis Moderada	Hipótesis Alta	Hipótesis Muy Alta
	<p>Las PYMES, aunque rezagadas, comienzan a participar a través de incentivos básicos como créditos verdes y beneficios fiscales, fomentando una adopción gradual de prácticas sostenibles en diferentes sectores clave como manufactura, agroindustria y energía La participación de empresas colombianas en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica alcanza hasta un 25%, reflejando avances selectivos en sostenibilidad.</p>	<p>especializados, como microcréditos verdes, fondos de inversión sostenible, capacitación técnica, entre otros. Esto permite una adopción estructurada de prácticas sostenibles, aumentando la generación de empleo verde y posicionando a Colombia con una participación estimada entre el 24-34% en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica.</p>	<p>prácticas sostenibles, sino que son actores clave en cadenas de valor circulares, integrándose con grandes empresas en la generación de soluciones innovadoras. Este alto compromiso impulsa una generación masiva de empleo verde y posiciona a Colombia como referente regional y global, alcanzando una participación superior al 35% en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica, reflejando un liderazgo global en transición energética.</p>
<p>Innovación Tecnológica</p>	<p>La participación de FNCER en la matriz energética de Colombia alcanza aproximadamente el 20%, impulsada principalmente por la expansión de energía solar y eólica; sin embargo, el impulso hacia otras fuentes alternativas sigue siendo limitado, lo que impide alcanzar la meta de FNCER establecida en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC). Paralelamente, el país continúa desarrollando pozos de gas para mantener su independencia</p>	<p>Masificación de tecnologías para la transición, logrando un superávit energético que incluye la producción de hidrógeno verde, tanto para consumo interno como para exportación, posicionando a Colombia como uno de los principales exportadores de este energético en América Latina, junto a Chile. La participación de FNCER en la matriz energética supera el 20%, alcanzando cifras cercanas al 50%, con una fuerte apropiación de la energía solar y eólica, y un impulso notable en otras tecnologías energéticas renovables y avanzadas,</p>	<p>Se logra interdependencia tecnológica y una matriz energética segura, resiliente y diversificada, soportada por infraestructura de red moderna. La participación de FNCER supera el 50% en la matriz energética colombiana, con energéticos como la geotermia, energías oceánicas, e integrada con sistemas de almacenamiento avanzados, como las hidroeléctricas de almacenamiento por bombeo (PHS), la captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS),</p>

Variable Estratégica	Hipótesis Moderada	Hipótesis Alta	Hipótesis Muy Alta
	<p>energética. En el ámbito de la movilidad eléctrica, se logra un aumento en la adopción de vehículos eléctricos, pero tampoco se alcanza las metas propuestas debido a insuficiencia de las políticas públicas y los incentivos necesarios.</p>	<p>incluyendo potencialmente la energía nuclear. El gas sigue siendo un pilar clave en la transición a una matriz energética diversificada y baja en emisiones, sustituyendo energéticos como el carbón, e integrado con alternativas de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS). La movilidad eléctrica se integra de manera efectiva, cumpliendo con la meta establecida en la NDC, respaldada por políticas públicas sólidas y una infraestructura adecuada.</p>	<p>permitiendo una transición completa hacia tecnologías limpias que optimizan el uso de los recursos naturales y energéticos del país. La movilidad eléctrica se ha masificado con una infraestructura adecuada y una integración plena en el sistema energético nacional, contribuyendo de manera significativa a la reducción de emisiones y el cumplimiento de las metas climáticas.</p>
<p>Interoperabilidad de los sistemas energéticos</p>	<p>Se desarrollan avances para un sistema energético interoperable a nivel nacional, donde las tecnologías inteligentes y de seguridad de la información permiten integrar recursos distribuidos, los prosumidores son principalmente las industrias y comercios, se establecen interconexiones iniciales con mercados regionales de energía.</p>	<p>Se consolida un sistema energético basado en tecnologías inteligentes, con una generación distribuida fortalecida, una participación activa de las redes inteligentes (Smart Grids) y comunidades energéticas que democratizan el acceso a la energía. Las interconexiones internacionales se enfocan exclusivamente en la exportación de superávit energético renovable, sin alcanzar mercados energéticos completamente integrados.</p>	<p>Colombia transforma su sistema energético en un modelo de gestión activa de la demanda, donde los consumidores se convierten en prosumidores (productores y consumidores) y la demanda energética es gestionada en tiempo real a través de tecnologías inteligentes y redes digitales. Este sistema permite la participación directa de hogares, empresas y comunidades en los mercados energéticos, equilibrando oferta y demanda de manera descentralizada y maximizando el uso eficiente</p>

Variable Estratégica	Hipótesis Moderada	Hipótesis Alta	Hipótesis Muy Alta
Nuevos Modelos de Negocio Circulares	Colombia desarrolla una economía circular en el sector energético basada en la gestión eficiente de residuos , fortaleciendo la recolección, reciclaje y reutilización de componentes como baterías, paneles solares y turbinas eólicas. Siguiendo modelos aplicados en países como Alemania, el país establece incentivos fiscales y alianzas público-privadas para impulsar tecnologías de valorización de residuos orgánicos , como biomasa y biogás, que representan un 15% de la matriz energética nacional. Este modelo fomenta la extensión de la vida útil de los productos mediante prácticas de mantenimiento predictivo y programas de devolución.	Colombia implementa un sistema energético circular que recupera y reutiliza al menos el 70% de los materiales críticos, inspirado en casos como el de Japón, donde el diseño modular y ecoeficiente de baterías y paneles solares permite extender su vida útil y facilitar su reciclaje. El país masifica tecnologías de valorización de residuos industriales y agrícolas, aumentando la participación de energías derivadas de biomasa y biogás al 25% de la matriz energética. Además, establece marcos regulatorios robustos y plataformas digitales para fomentar la adopción de modelos de negocio basados en productos como servicios , optimizando la eficiencia y sostenibilidad de las cadenas de valor.	del superávit renovable para exportaciones estratégicas. Colombia lidera en América Latina con un sistema energético circular avanzado , similar al modelo de Dinamarca, que alcanza una recuperación total de materiales críticos mediante una infraestructura nacional de reciclaje de alta tecnología. El diseño modular y el rediseño constante de componentes energéticos, como turbinas eólicas y paneles solares, garantizan su reutilización y adaptación a nuevas tecnologías. Energías renovables derivadas de residuos orgánicos e industriales contribuyen al 40% de la matriz energética.
Huella de carbono	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero inferior al 60% para el 2040, consolidando las acciones planificadas en el NDC como la reforestación, el manejo de	Colombia alcanza una reducción de emisiones entre el 60- 80% , mediante una masificación de las FNCER, integrando hidrógeno verde en el sector transporte e industrial. Se incluyen avances en biogás	Se logra una reducción de emisiones superior al 80% , mediante una transformación integral en todos los sectores de la economía hacia la carbononeutralidad, mediante

Variable Estratégica	Hipótesis Moderada	Hipótesis Alta	Hipótesis Muy Alta
	<p>agua y residuos, así como la adopción de FNCER en la matriz energética. Estas medidas, lideradas por políticas nacionales y proyectos financiados por organismos multilaterales, se concentran en sectores estratégicos como generación eléctrica, transporte urbano y producción de hidrocarburos, dejando rezagados los sectores más dispersos y rurales, como la ganadería, agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU), transporte rural, etc.</p>	<p>a partir de residuos sólidos, digitalización de redes eléctricas y agricultura de precisión, promovidos por incentivos fiscales y financiamiento internacional. Este escenario involucra activamente a comunidades rurales y PYMES, logrando una reducción equitativa y amplia. Adicionalmente, se logran reducciones importantes no solo en el sector energético sino también en otros como la ganadería, agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU), transporte rural, etc.</p>	<p>tecnologías disruptivas de almacenamiento de energía y de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) en industrias de alto impacto, alta expansión del hidrógeno verde en la matriz energética y la integración total de redes inteligentes en el sistema energético. Este avance incluye agricultura regenerativa y alianzas con comunidades indígenas para proyectos de conservación masiva. Liderada por un marco regulatorio robusto y financiamiento internacional, Colombia se posiciona como referente regional en acción climática.</p>

Fuente: Elaboración propia

7.1.2 Reducción del espacio morfológico

En esta segunda fase, se busca reducir el espacio morfológico previamente construido, delimitando un subespacio útil compuesto por combinaciones posibles, es decir, aquellas que son lógicamente coherentes y que pueden suceder si las condiciones adecuadas se presentan.

Este proceso es fundamental, dado que con tres (3) hipótesis para seis (6) variables se generan 729 combinaciones teóricas; sin embargo, muchas de estas configuraciones resultan contradictorias o inviables, por lo que es necesario aplicar criterios de coherencia para descartar aquellas que no representan escenarios factibles.

La selección de combinaciones coherentes se llevó a cabo con el apoyo de un grupo de expertos, a quienes se solicitó construir escenarios o “imágenes de futuro”. Para ello, se enfatizó que estos no necesariamente deben representar un futuro ideal, sino uno razonable, factible y deseable dentro de un marco de acción en el país tenga cierto grado de capacidad de acción o “governabilidad” para su lograr su cumplimiento.

Cada experto eligió una hipótesis por variable asegurando que, según su conocimiento y experiencia, la combinación resultante cumpliera con los siguientes criterios clave: coherencia entre las ideas, pertinencia para la transición energética, transparencia para facilidad en su comprensión, y verosimilitud.

Posteriormente, se logró alcanzar un consenso sobre tres (3) escenarios representativos, los cuales fueron denominados: “Oportunidad perdida”, “Crear es crear” y “Prometeo”, y cuyas combinaciones resaltadas en color verde se plasman en las Tablas 24-26.

Tabla 24. Combinación No. 1 “Oportunidad perdida”

Variable Estratégica	Hipótesis Moderada	Hipótesis Alta	Hipótesis Muy Alta
Negociaciones entre Actores Clave	Colombia consolida alianzas estratégicas internacionales. A nivel nacional, la articulación entre el gobierno, el sector privado y la sociedad civil sigue siendo desigual.	Se establece un sistema de gobernanza energética que articula sinergias internacionales y nacionales. Se trabaja con mayor dinamismo en la inclusión de actores pequeños y medianos.	Posicionamiento de Colombia como un líder global en transición energética. Se logra una articulación total entre actores nacionales e internacionales, grandes, medianas y pequeñas empresas.
Compromiso del Sector Empresarial	El compromiso empresarial con la transición energética y sostenibilidad crece moderadamente, liderado por grandes empresas. Participación de empresas colombianas en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica alcanza hasta un 25%.	Grandes empresas liderando la innovación tecnológica en energías limpias y PYMES integrándose progresivamente. Participación de empresas colombianas estimada entre el 24-34% en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica.	Colombia como referente regional y global, alcanzando una participación superior al 35% en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica, reflejando un liderazgo global en transición energética.
Innovación Tecnológica	Participación de FNCER en la matriz energética de Colombia alcanza aproximadamente el 20%.	Participación de FNCER en la matriz energética supera el 20%, alcanzando cifras cercanas al 50%.	Participación de FNCER supera el 50% en matriz energética colombiana.
Interoperabilidad de los sistemas energéticos	Se desarrollan avances para un sistema energético interoperable a nivel nacional.	Se consolida un sistema energético con interconexiones internacionales, sin alcanzar mercados energéticos completamente integrados.	Colombia transforma su sistema energético en un modelo de gestión activa de la demanda, con superávit renovable para exportaciones estratégicas.
Nuevos Modelos de Negocio Circulares	Economía circular en el sector energético basada en la gestión eficiente de residuos. Valorización de residuos orgánicos, como biomasa y biogás, que representan un 15% de la matriz energética nacional.	Recuperación y reutilización al menos del 70% de los materiales críticos. Participación biomasa y biogás en un 25% de la matriz energética.	Sistema energético circular avanzado. Energías renovables derivadas de residuos orgánicos e industriales contribuyen al 40% de la matriz energética.
Huella de carbono	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero inferior al 60%.	Colombia alcanza una reducción de emisiones entre el 60- 80%.	Se logra una reducción de emisiones superior al 80%.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Combinación No. 2 “Crear es crear”

Variable Estratégica	Hipótesis Moderada	Hipótesis Alta	Hipótesis Muy Alta
Negociaciones entre Actores Clave	Colombia consolida alianzas estratégicas internacionales. A nivel nacional, la articulación entre el gobierno, el sector privado y la sociedad civil sigue siendo desigual.	Se establece un sistema de gobernanza energética que articula sinergias internacionales y nacionales. Se trabaja con mayor dinamismo en la inclusión de actores pequeños y medianos.	Posicionamiento de Colombia como un líder global en transición energética. Se logra una articulación total entre actores nacionales e internacionales, grandes, medianas y pequeñas empresas.
Compromiso del Sector Empresarial	El compromiso empresarial con la transición energética y sostenibilidad crece moderadamente, liderado por grandes empresas. Participación de empresas colombianas en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica alcanza hasta un 25%.	Grandes empresas liderando la innovación tecnológica en energías limpias y PYMES integrándose progresivamente. Participación de empresas colombianas estimada entre el 24-34% en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica.	Colombia como referente regional y global, alcanzando una participación superior al 35% en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica, reflejando un liderazgo global en transición energética.
Innovación Tecnológica	Participación de FNCER en la matriz energética de Colombia alcanza aproximadamente el 20%.	Participación de FNCER en la matriz energética supera el 20%, alcanzando cifras cercanas al 50%.	Participación de FNCER supera el 50% en matriz energética colombiana.

Interoperabilidad de los sistemas energéticos	Se desarrollan avances para un sistema energético interoperable a nivel nacional.	Se consolida un sistema energético con interconexiones internacionales, sin alcanzar mercados energéticos completamente integrados.	Colombia transforma su sistema energético en un modelo de gestión activa de la demanda, con superávit renovable para exportaciones estratégicas.
Nuevos Modelos de Negocio Circulares	Economía circular en el sector energético basada en la gestión eficiente de residuos. Valorización de residuos orgánicos, como biomasa y biogás, que representan un 15% de la matriz energética nacional.	Recuperación y reutilización al menos del 70% de los materiales críticos. Participación biomasa y biogás en un 25% de la matriz energética.	Sistema energético circular avanzado. Energías renovables derivadas de residuos orgánicos e industriales contribuyen al 40% de la matriz energética.
Huella de carbono	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero inferior al 60%.	Colombia alcanza una reducción de emisiones entre el 60- 80%.	Se logra una reducción de emisiones superior al 80%.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Combinación No. 3 “Prometeo”

Variable Estratégica	Hipótesis Moderada	Hipótesis Alta	Hipótesis Muy Alta
Negociaciones entre Actores Clave	Colombia consolida alianzas estratégicas internacionales. A nivel nacional, la articulación entre el gobierno, el sector privado y la sociedad civil sigue siendo desigual.	Se establece un sistema de gobernanza energética que articula sinergias internacionales y nacionales. Se trabaja con mayor dinamismo en la inclusión de actores pequeños y medianos.	Posicionamiento de Colombia como un líder global en transición energética. Se logra una articulación total entre actores nacionales e internacionales, grandes, medianas y pequeñas empresas.
Compromiso del Sector Empresarial	El compromiso empresarial con la transición energética y sostenibilidad crece moderadamente, liderado por grandes empresas. Participación de empresas colombianas en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica alcanza hasta un 25%.	Grandes empresas liderando la innovación tecnológica en energías limpias y PYMES integrándose progresivamente. Participación de empresas colombianas estimada entre el 24-34% en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica.	Colombia como referente regional y global, alcanzando una participación superior al 35% en el índice de sostenibilidad Dow Jones en Latinoamérica, reflejando un liderazgo global en transición energética.
Innovación Tecnológica	Participación de FNCER en la matriz energética de Colombia alcanza aproximadamente el 20%.	Participación de FNCER en la matriz energética supera el 20%, alcanzando cifras cercanas al 50%.	Participación de FNCER supera el 50% en matriz energética colombiana.
Interoperabilidad de los sistemas energéticos	Se desarrollan avances para un sistema energético interoperable a nivel nacional.	Se consolida un sistema energético con interconexiones internacionales, sin alcanzar mercados energéticos completamente integrados.	Colombia transforma su sistema energético en un modelo de gestión activa de la demanda, con superávit renovable para exportaciones estratégicas.
Nuevos Modelos de Negocio Circulares	Economía circular en el sector energético basada en la gestión eficiente de residuos. Valorización de residuos orgánicos, como biomasa y biogás, que representan un 15% de la matriz energética nacional.	Recuperación y reutilización al menos del 70% de los materiales críticos. Participación biomasa y biogás en un 25% de la matriz energética.	Sistema energético circular avanzado. Energías renovables derivadas de residuos orgánicos e industriales contribuyen al 40% de la matriz energética.
Huella de carbono	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero inferior al 60%.	Colombia alcanza una reducción de emisiones entre el 60- 80%.	Se logra una reducción de emisiones superior al 80%.

Fuente: Elaboración propia

7.1.3 Escenarios posibles

A continuación, se presentan los escenarios posibles seleccionados junto con su narrativa de futuro, con el propósito de examinar en detalle los eventos e hitos que los configuran. Estas narrativas buscan construir una evolución coherente y realista, permitiendo comprender cómo podrían desarrollarse los acontecimientos en cada escenario.

Figura 64. Resumen de escenarios posibles

Oportunidad perdida	Crear... es crear	Prometeo
Colombia logra avances significativos en innovación tecnológica y economía circular liderados por el sector empresarial, pero enfrenta desafíos de gobernanza y conectividad energética. No alcanza la meta de 1.5°.	Colombia lidera la transición energética gracias a la adopción masiva de tecnologías disruptivas y su impacto en la reducción de emisiones. Si bien la gobernanza, el compromiso empresarial y los modelos circulares avanzan de manera sólida, es la innovación tecnológica y la acción climática lo que permite a Colombia cumplir y superar los objetivos climáticos globales.	Representa el ideal de una transición energética justa y transparente, alineada con las metas climáticas globales, que posiciona a Colombia como un modelo global de sostenibilidad.

Fuente: Elaboración propia

Escenario 1. Oportunidad perdida. Para el año 2040, Colombia ha avanzado en su transición energética, pero de manera desigual. El liderazgo del sector empresarial ha permitido el desarrollo de soluciones innovadoras y la consolidación de modelos de negocio circulares, especialmente entre grandes compañías con presencia internacional. Sin embargo, la falta de una gobernanza articulada ha limitado la participación de actores pequeños y medianos, dejando rezagadas a muchas PYMES y comunidades.

Aunque la participación de energías renovables en la matriz energética alcanza el 20%, el país no logra masificar el uso de hidrógeno verde ni otras tecnologías emergentes. La infraestructura de almacenamiento energético sigue siendo limitada, lo que restringe el aprovechamiento de la energía generada a partir de fuentes limpias.

Las redes inteligentes han comenzado a integrarse en el sistema eléctrico nacional, pero sin una interoperabilidad plena que permita un modelo energético descentralizado y accesible para todos. Esto ha generado barreras para la adopción de nuevas tecnologías y ha frenado el desarrollo de mercados energéticos dinámicos.

En términos de reducción de emisiones, Colombia ha logrado avances moderados, pero no suficientes para cumplir con sus compromisos climáticos. Aunque sectores estratégicos como la generación eléctrica y el transporte han reducido su impacto ambiental, otros, como la agricultura y el transporte rural, continúan generando altos niveles de emisiones.

A pesar de los avances, Colombia pierde la oportunidad de convertirse en un líder regional en transición energética. El país sigue dependiendo de combustibles fósiles y no logra consolidar una estructura energética resiliente, sostenible y competitiva a nivel global.

Escenario 2. Creer es crear. Es el año 2040, y Colombia ha consolidado un modelo energético robusto, equitativo e innovador, donde la transición energética ha dejado de ser una aspiración para convertirse en una realidad tangible. La gobernanza energética ha evolucionado hacia un sistema articulado de cooperación entre actores nacionales e internacionales, permitiendo que pequeños y medianos participantes accedan a tasas preferenciales y esquemas de incentivos que facilitan la inversión en energías renovables. La descentralización ha sido clave, democratizando el acceso a tecnologías limpias y financiamiento verde, asegurando una transición justa e incluyente.

El sector empresarial ha sido un motor fundamental del cambio. Las grandes compañías han encabezado el desarrollo de soluciones energéticas avanzadas, mientras que las PYMES han encontrado en la transición una oportunidad viable y estructurada gracias a esquemas de microcréditos verdes, fondos de inversión sostenible y capacitación técnica especializada. Como resultado, Colombia ha escalado en los índices de sostenibilidad globales, con una participación del 24-34% en el Dow Jones Sustainability Index para América Latina.

El avance tecnológico ha permitido que el país logre un superávit energético, con una matriz dominada por fuentes renovables en más del 50%, lideradas por energía solar, eólica y geotérmica. Colombia se ha consolidado como un actor clave en la exportación de hidrógeno verde en América Latina, posicionándose junto a Chile en la vanguardia de este mercado emergente. El gas natural ha mantenido su relevancia como un pilar de transición, permitiendo una sustitución del uso de carbón e integrándose con

tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) para mitigar emisiones.

La generación distribuida ha fortalecido la resiliencia energética, mientras que las redes inteligentes (Smart Grids) y comunidades energéticas han permitido una gestión descentralizada y eficiente del consumo. La interconexión internacional se ha optimizado, enfocándose en la exportación de superávit renovable sin depender de mercados energéticos completamente integrados.

El enfoque hacia la economía circular ha transformado la industria. Inspirado en modelos como el japonés, Colombia ha implementado un sistema de recuperación y reutilización de materiales críticos, logrando que al menos el 70% de los componentes de baterías y paneles solares sean reciclados y reinsertados en la cadena productiva. La valorización de residuos industriales y agrícolas ha impulsado la participación de energías como biomasa y biogás hasta un 25% de la matriz energética, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.

Estos esfuerzos han llevado a una reducción de emisiones entre el 60-80%, con avances significativos en sectores de difícil descarbonización como transporte, agricultura y ganadería. La integración de biogás, electrificación, redes inteligentes y agricultura de precisión ha permitido que la transformación energética no solo beneficie a los grandes centros urbanos, sino que también tenga un impacto positivo en comunidades rurales y economías locales.

Escenario 3. Prometeo. Corre el año 2040 y Colombia ha trascendido sus propios límites y se ha consolidado como un modelo global de sostenibilidad energética. A través de un ecosistema inclusivo y altamente innovador, el país ha logrado una articulación total entre actores nacionales e internacionales, estableciendo una gobernanza energética de vanguardia.

El sector empresarial ha asumido la transición energética como el eje central de su competitividad. No solo las grandes compañías han transformado sus procesos, sino que las PYMES han adoptado modelos de negocio circulares, participando activamente en cadenas de valor sostenibles. La generación de empleo verde ha alcanzado niveles históricos, y el país es reconocido como un líder en prácticas ESG a nivel global.

La interoperabilidad del sistema energético ha alcanzado su máxima expresión. Las redes inteligentes permiten gestionar la demanda en tiempo real, optimizando el uso de los recursos y garantizando un suministro energético eficiente. La digitalización y la inteligencia artificial han integrado hogares, empresas y comunidades en un ecosistema energético dinámico y descentralizado.

La matriz energética ha logrado una transformación total, con más del 50% de participación de fuentes renovables y una diversificación sin precedentes. Tecnologías como la geotermia, la energía oceánica y sistemas avanzados de almacenamiento han permitido un aprovechamiento óptimo de los recursos. Colombia se ha convertido en un hub de innovación en energías limpias, exportando conocimientos y tecnologías a otras regiones del mundo.

La huella de carbono se ha reducido en un 80%, permitiendo que el país alcance la carbono neutralidad en la mayoría de sus sectores. La combinación de captura y almacenamiento de carbono, movilidad sostenible y eficiencia energética ha hecho de Colombia un líder en la lucha contra el cambio climático.

El país ha demostrado que la transición energética no solo es posible, sino que es el camino hacia un desarrollo sostenible, equitativo y resiliente.

7.2 Análisis multicriterio

Una vez planteados los tres (3) escenarios posibles descritos anteriormente, se realiza el análisis multicriterio con el fin de seleccionar el escenario “apuesta”, sobre el cual se decidirá orientar los esfuerzos y posteriormente plantear estrategias.

Como metodología para el desarrollo de este análisis, en primer lugar se asignó a cada hipótesis un puntaje en función de la dificultad o reto que implica su cumplimiento, de esta forma, el puntaje (1) se asignó a las hipótesis Moderadas, (2) a las Altas y (3) a las Muy Altas. Esto se realiza para cada variable según el escenario analizado, tomando como referencia las configuraciones plasmadas en las Tablas 24-26, con el fin de medir el grado de retos y de consenso de los escenarios.

Posteriormente, se calculó el promedio y desviación estándar para cada escenario como se presenta en la Tabla 27, y se obtuvo un comparativo de retos agrupado por escenarios y variables, ilustrado en las Figuras 65 y 66.

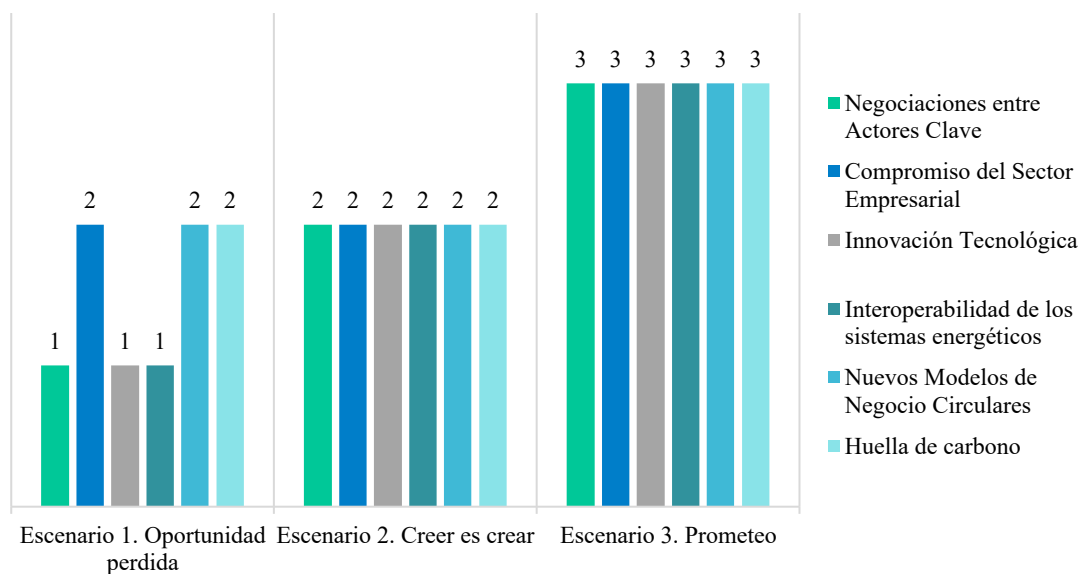
Tabla 27. Promedios y desviaciones de los escenarios

Variable Estratégica	Escenario 1. Oportunidad perdida	Escenario 2. Crear es crear	Escenario 3. Prometeo
Negociaciones entre Actores Clave	1	2	3
Compromiso del Sector Empresarial	2	2	3
Innovación Tecnológica	1	2	3
Interoperabilidad de los sistemas energéticos	1	2	3
Nuevos Modelos de Negocio Circulares	2	2	3
Huella de carbono	2	2	3
Promedio	1,50	2,0	3,00
Desviación estándar	0,55	0,00	0,00

Promedio de promedios	2,17
Promedio de desviaciones	0,18

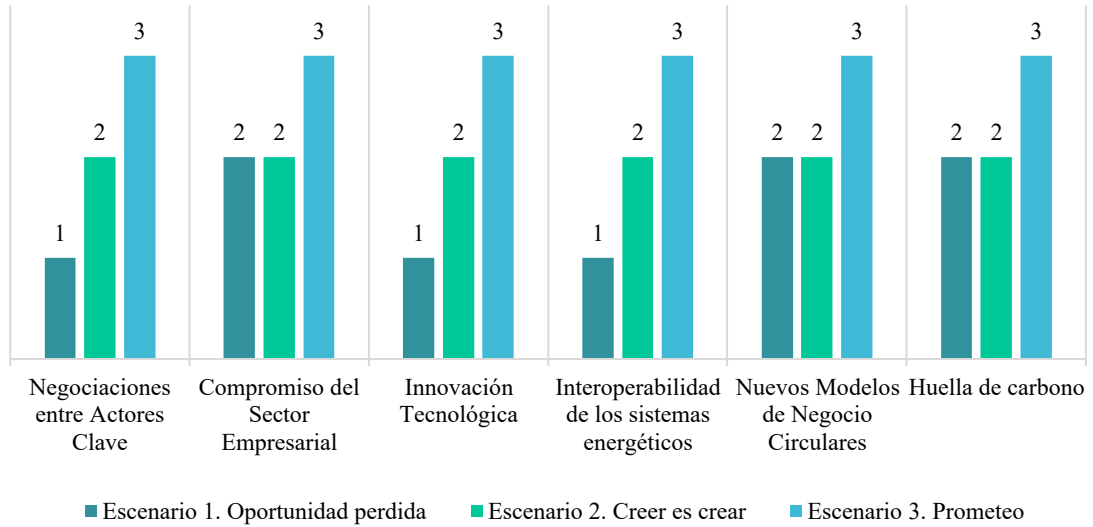
Fuente: Elaboración propia

Figura 65. Comparativo de escenarios según variables



Fuente: Elaboración propia

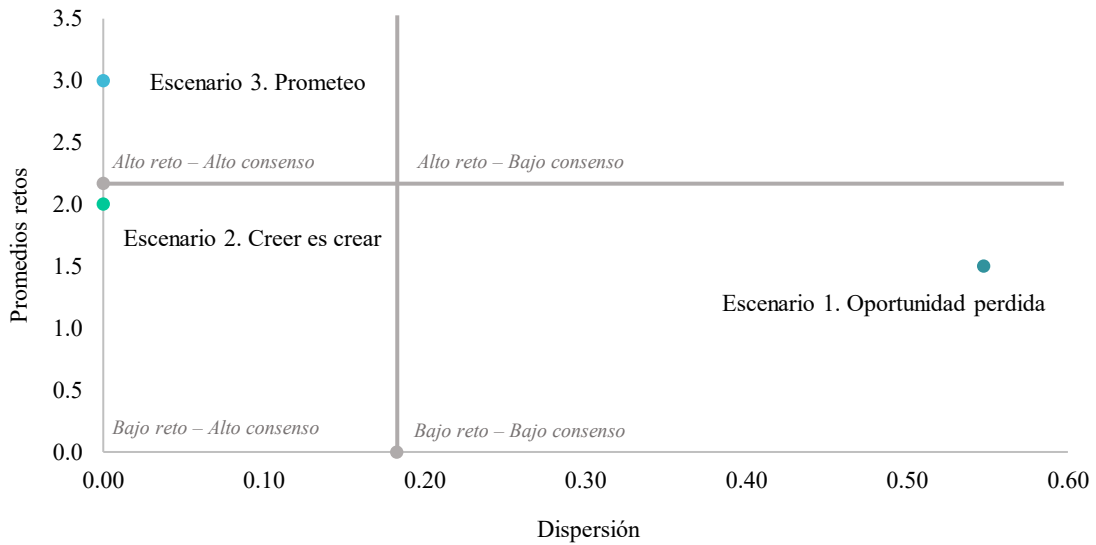
Figura 66. Comparativo de variables según escenarios



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, con base en los promedios y desviaciones calculados en la Tabla 27, se ubicó cada distribución de calificaciones de escenarios y las dispersiones en un plano cartesiano que permita determinar fácilmente aquellos más coherentes, teniendo en cuenta que en la ordenada o *eje y* se ubican los promedios de reto de los escenarios y en la abscisa o *eje x* las desviaciones, tal como se evidencia en la Figura 67.

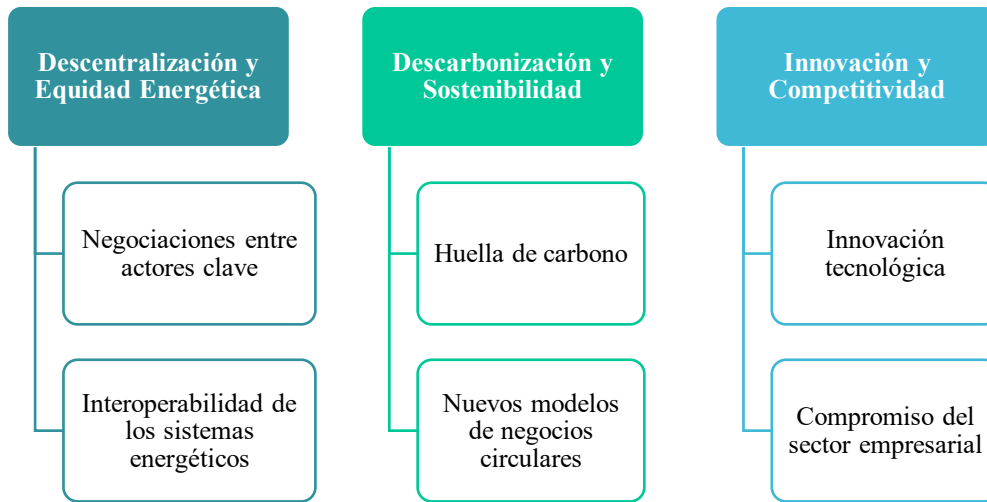
Figura 67. Dispersión de los escenarios según el reto de sus hipótesis



Fuente: Elaboración propia

Una vez se contó con un panorama del nivel de reto y consenso de cada escenario, se definieron tres (3) anhelos o “criterios” en relación con la transición energética en Colombia, siendo estos: (i) descentralización y equidad energética, (ii) descarbonización y sostenibilidad, (iii) innovación y competitividad, y entorno a estos se agruparon las variables estratégicas, como se presenta a continuación.

Figura 68. Anhelos o criterios propuestos



Fuente: Elaboración propia

Según los criterios definidos, se calificaron los escenarios con el fin de determinar el que más cumple y se alinea a cada anhelo planteado, relacionando en cada caso las variables estratégicas agrupadas en la Figura 67 y asignando la calificación de reto dada a cada hipótesis en la Tabla 27. Teniendo en cuenta que cada criterio cuenta con más de una variable, se promedió su respectiva calificación y se obtuvo los valores presentados a continuación para cada criterio según el escenario analizado.

Tabla 28. Calificación de criterios por escenario

Criterio: Descentralización y Equidad energética

Variable Estratégica	Escenario 1. Oportunidad perdida	Escenario 2. Crear es crear	Escenario 3. Prometeo
Negociaciones entre Actores Clave	1	2	3
Interoperabilidad de los sistemas energéticos	1	2	3
Promedio	1	2	3

Criterio: Descarbonización y sostenibilidad

Variable Estratégica	Escenario 1. Oportunidad perdida	Escenario 2. Crear es crear	Escenario 3. Prometeo
Compromiso del Sector Empresarial	2	2	3
Innovación Tecnológica	1	2	3
Promedio	1,5	2	3

Criterio: Innovación y competitividad

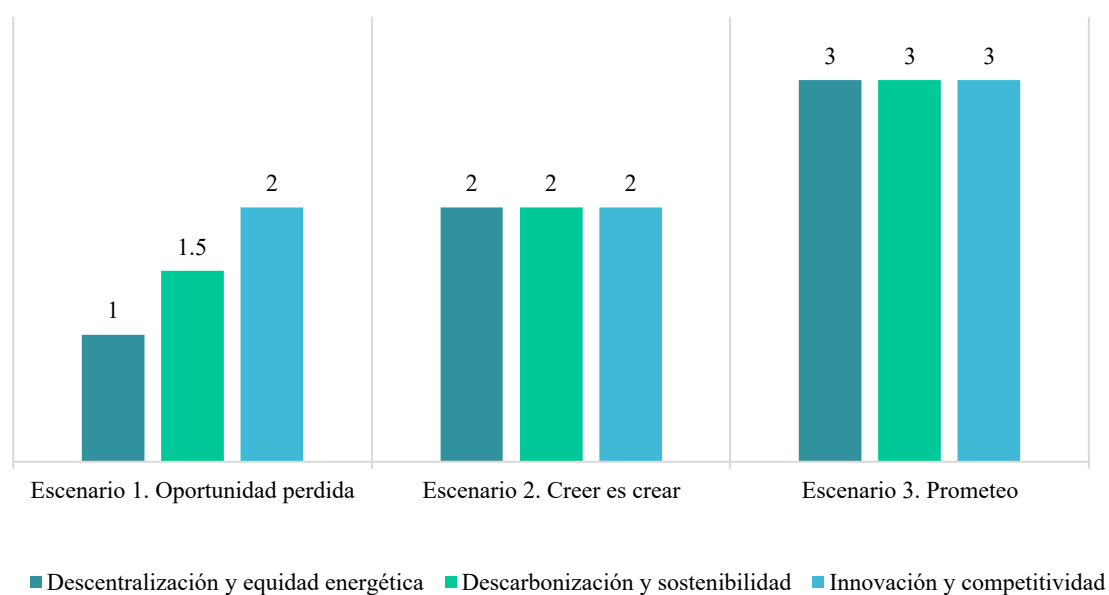
Variable Estratégica	Escenario 1. Oportunidad perdida	Escenario 2. Crear es crear	Escenario 3. Prometeo
Huella de carbono	2	2	3
Nuevos Modelos de Negocio Circulares	2	2	3
Promedio	2	2	3

Resumen criterios promediados por escenario

Criterio	Escenario 1. Oportunidad perdida	Escenario 2. Crear es crear	Escenario 3. Prometeo
Descentralización y equidad energética	1	2	3
Descarbonización y sostenibilidad	1,5	2	3
Innovación y competitividad	2	2	3

Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Comparación de escenarios según los criterios



Fuente: Elaboración propia

Como resultado de los análisis realizados anteriormente frente al reto, consenso y cumplimiento de los anhelos en cada escenario, se obtuvieron las conclusiones presentadas a continuación con el fin de suministrarlas al grupo de expertos para la posterior elección del “escenario apuesta”:

- Todos los escenarios planteados presentan importantes retos para su cumplimiento, puesto que se consideró avances significativos en la transición energética para cada una de las hipótesis y se partió de un reto moderado, más no bajo o pesimista.
- Las variables compromiso del sector empresarial, nuevos modelos de negocio circulares y huella de carbono son las que cuentan con hipótesis más retadoras.
- El escenario “Prometeo” es el que posee mayores retos con un alto grado de consenso por parte de los expertos, mientras que el escenario “Crear es crear” tiene un bajo reto y un alto consenso.
- El escenario "Oportunidad perdida" representa un menor reto frente a los otros, sin embargo, presenta ciertas incoherencias y un bajo consenso.
- Si queremos llevar al país a superar las metas propuestas en materia de transición energética y alcanzar el mayor logro en todos los anhelos planteados, el escenario con el impacto más alto es “Prometeo”.
- Si queremos lograr un cumplimiento de las metas trazadas por el país satisfactoriamente, el escenario que lo permite es “Crear es Crear”.
- Tanto el escenario “Crear es Crear”, como el “Oportunidad perdida”, permiten cumplir el anhelo de un país innovador y competitivo en materia de transición energética.

7.2.1 Elección del escenario apuesta

Para la selección del escenario se empleó el método del “Ábaco de Régnier”, el cual es una técnica de consulta estructurada que permite recopilar y analizar las opiniones de expertos mediante una escala visual basada en colores. Su propósito es facilitar la evaluación de diferentes opciones, escenarios o variables, empleando una representación cromática que refleja distintos niveles de acuerdo o valoración.

Este enfoque utiliza la lógica del semáforo: verde (positivo), naranja (neutral) y rojo (negativo), pero introduce matices adicionales con verde claro y rojo claro, lo que permite capturar con mayor precisión las opiniones intermedias y suavizar los juicios extremos.

Para ello, se mapea en primer lugar los argumentos a favor y en contra de los tres (3) escenarios posibles seleccionados anteriormente, los cuales se plasman en la Tabla 29, con el fin de socializarlos al grupo de expertos previo a su valoración.

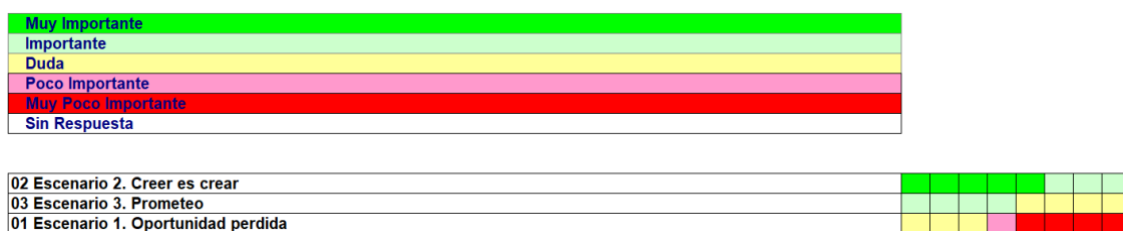
Tabla 29. Argumentos a favor y en contra de los escenarios posibles

Escenario	Argumentos a favor	Argumentos en contra
Escenario 1. Oportunidad perdida	<ul style="list-style-type: none"> Se mantienen los costos energéticos relativamente estables en el corto plazo al no hacer cambios disruptivos en la matriz energética. Las industrias tradicionales no enfrentan presiones inmediatas para transformarse, lo que les permite operar sin inversiones adicionales. Se evita una dependencia fuerte de financiamiento externo o compromisos internacionales difíciles de cumplir. 	<ul style="list-style-type: none"> Colombia pierde competitividad en la región al no aprovechar su potencial en energías renovables y economía circular. Aumenta el riesgo de rezago tecnológico y dependencia de combustibles fósiles en un contexto global que avanza hacia la descarbonización. Se desaprovechan oportunidades de generación de empleo verde y atracción de inversión en sectores emergentes. La falta de interoperabilidad y descentralización limita el desarrollo de comunidades energéticas y redes inteligentes.
Escenario 2. Crear es crear	<ul style="list-style-type: none"> Se logra un avance progresivo en la transición energética, con una adopción estructurada de tecnologías y modelos de negocio sostenibles. Se facilita la participación de más actores en el mercado energético, promoviendo beneficios para PYMES y comunidades energéticas. El país avanza en la reducción de emisiones, aunque a un ritmo más conservador, asegurando estabilidad en el sector. Se establecen regulaciones y marcos de financiamiento que incentivan la transición sin generar <u>disrupciones abruptas en la economía.</u> 	<ul style="list-style-type: none"> La velocidad de la transición es menor, lo que podría hacer que Colombia pierda competitividad frente a otros países más ambiciosos. No se capitaliza completamente el potencial de exportación de energías renovables ni del hidrógeno verde. La persistencia de combustibles fósiles en la matriz energética retrasa la meta de descarbonización total y podría mantener ciertos impactos ambientales.
Escenario 3. Prometeo	<ul style="list-style-type: none"> Colombia se posiciona como líder en América Latina en energías renovables, con un ecosistema de innovación tecnológica sólido. Se logra una reducción significativa de emisiones (hasta 80%), con un sistema energético más eficiente, circular e integrado. Las empresas, tanto grandes como PYMES, participan activamente en la transición, fortaleciendo la economía y el empleo verde. La interoperabilidad del sistema energético permite una descentralización efectiva y un mejor aprovechamiento del superávit energético. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere inversiones iniciales muy altas en infraestructura, innovación y digitalización, lo que puede representar desafíos fiscales. La dependencia de alianzas internacionales y financiamiento externo puede generar vulnerabilidad ante cambios políticos o económicos globales. La masificación de nuevas tecnologías podría enfrentar barreras regulatorias o de aceptación social en sectores tradicionales.

Fuente: Elaboración propia

Con base en ello, se solicita a los expertos su valoración asignando a cada escenario una calificación de recomendabilidad o “importancia”, teniendo en los siguientes criterios: (i) verde oscuro: escenario Muy Importante (puntaje 5), (ii) verde claro (puntaje 4): escenario Importante, (iii) amarillo: existe Duda (puntaje 3), (iv) rosado: escenario Poco Importante (puntaje 2) y (v) rojo: escenario Muy poco Importante (1). Los resultados se plasman en la Figura 70, en donde se evidencia que el escenario apuesta seleccionado es “Crear es Crear”.

Figura 70. Resultados Ábaco de Regnier



Fuente: Elaboración propia

7.3 Análisis de Probabilidades mediante Sistema de Matrices de Impacto Cruzado (SMIC)

El método de impactos cruzados permite evaluar los cambios en las probabilidades de las diferentes hipótesis formuladas para cada variable estratégica teniendo en cuenta las interacciones entre ellas o su ocurrencia.

7.3.1 Formulación y evaluación de las hipótesis probabilísticas

Para el desarrollo de la valoración de las probabilidades, se seleccionó para cada variable estratégica un indicador o sistema de medición cuantitativo o cualitativo (este último en caso de no contar con mediciones claras y específicas asociadas al indicador de la variable analizada) que permitan una formulación de hipótesis coherentes, junto a una probabilidad de ocurrencia planteada la cual es objeto de evaluación por el grupo de expertos, procurando que la probabilidad formulada no caiga en sesgos o polarización, siendo muy baja de manera que sea fácilmente realizable y evidentemente probable, pero tampoco demasiado retardadora de manera que no sea verosímil y sea altamente improbable. Se consolidó la data correspondiente al estado actual de los indicadores de

cada variable estratégica, con base la información investigada en los Capítulos 2 y 5, así como sus respectivas proyecciones de crecimiento, y se plantearon las probabilidades para cada hipótesis, resumidas en la Figura 71 y plasmadas en detalle en la Tabla 30.

Figura 71. Resumen de las hipótesis



Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Formulación de hipótesis

VARIABLES ESTRATÉGICAS	ABREV	SISTEMA DE EVALUACIÓN	FUENTE	ACTUAL	HIPÓTESIS
Innovación Tecnológica	Innovación	Cuantitativo: Participación de Energías Alternativas en la matriz energética de Colombia (%)	DNP 2024	3% (solar)	¿Qué tan probable es que en el año 2040 la participación de las energías alternativas en la matriz energética de Colombia supere el 20%, impulsada por el crecimiento de las inversiones en innovación tecnológica y la reducción progresiva de costos en energías renovables? Teniendo en cuenta que a marzo del 2024 la participación de renovables es del 3% (solar).
Compromiso del Sector Empresarial	Compromiso	Cuantitativo: Participación de empresas colombianas en el Dow Jones Sustainability World Index (%)	Reporte DJSI 2023 LATAM	16% participación en Latinoamérica	¿Qué tan probable es que al año 2040 al menos el 25% de las empresas incluidas en el Dow Jones Sustainability Latin America Index sean colombianas? Teniendo en cuenta que al año 2023 la participación de empresas colombianas en América Latina fue del 16%, y que ha venido en incremento la adopción de estrategias de responsabilidad corporativa enfocadas en sostenibilidad y transición energética.
Nuevos Modelos de Negocio Circulares	E.C.	Cualitativo: Nivel de adopción e implementación de nuevos modelos de economía circular	DANE 2019	Incipiente (Tasa de reciclaje y nueva utilización 11,80%)* *Este dato no se empleó ya que se limita a reciclaje.	¿Qué tan probable es que en el año 2040 Colombia alcance una alta adopción e implementación de nuevos modelos de negocios circulares? Teniendo en cuenta que en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 se planteó el objetivo de contar con un enfoque de economía circular, así como con leyes y políticas nacionales orientadas a la Gestión Integral de Residuos, Producción y Consumo Responsable, y Tratamiento de Aguas Residuales Industriales con objetivos específicos de reducción de emisiones de metano y aprovechamiento energético.

Variables Estratégicas	Abrev	Sistema de evaluación	Fuente	Actual	Hipótesis
Negociaciones entre Actores Clave	Actores	Cualitativo: Nivel de comportamiento de alianzas, clúster, convenios, mesas sectoriales, etc.	Cámaras de comercio	Incipiente	¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia cuente con un alto comportamiento de negociaciones entre actores? Teniendo en cuenta que actualmente se han establecido alianzas para fomentar la transición energética como la Mesa de Transición Energética Justa del Sistema Nacional de Cooperación Internacional, Alianza por el Clima y la Transición Energética Justa entre Colombia y Alemania, Mesa Sectorial de Transición Energética de la Cámara de Comercio Colombo-alemana (AHK Colombia), Alianza Energética 2030, entre otras.
Huella de carbono	Huella CO2	Cuantitativo: Porcentaje de reducción de emisiones GEI en el país (Ton CO2e/año)	INGEI 2021 - BUR3 Gobierno de Colombia	2018: 302.9 MTonCO2 eq	¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia logre reducir el 80% de sus emisiones de gases de efecto invernadero? Teniendo en cuenta que para el año 2018 se emitieron 302.9 MTonCO2eq y que la meta del país es reducir el 51 % las emisiones de GEI al 2030 y alcanzar la carbono neutralidad al 2050.
Interoperabilidad de los sistemas energéticos	Interoperabilidad	Cualitativo: Nivel de interoperabilidad en el sistema energético de Colombia	UPME / CREG / MinMinas	Incipiente	¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia cuente con una alta interoperabilidad en su sistema energético, con capacidades de respuesta de la red mejoradas, una flexibilidad optimizada en la gestión de recursos distribuidos y el inicio de automatización y control avanzados, mediante una transformación digital progresiva que integre inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IOT) y tecnologías de redes inteligentes en etapas estratégicas? Teniendo en cuenta que actualmente es incipiente en Colombia y se encuentra en una fase inicial con una baja implementación de microrredes eléctricas con sistemas de comunicaciones que aborde tecnologías emergentes como las IoT y la nube.

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que el análisis de las respuestas brindadas por el grupo de ocho (8) expertos será procesado mediante el software SMIC, y dadas las limitaciones del mismo en cuanto a cantidad de hipótesis a suministrar, se solicitó evaluar solo cinco (5) de las seis (6) hipótesis propuestas inicialmente. La hipótesis descartada fue la relacionada con la variable *compromiso del sector empresarial*, la cual se considera puede ser evaluada de manera implícita en la ocurrencia de la hipótesis planteada para la variable *negociaciones entre actores*. Adicionalmente, con el fin de facilitar el análisis frente a las probabilidades planteadas para cada hipótesis, también se relacionó y presentó al grupo de expertos los argumentos a favor y en contra frente al cumplimiento de cada una de estas presentados a continuación, plasmados en las Figuras 72-76.

Después de someter cada una de las hipótesis a votación, en donde se evaluó la probabilidad de logro de las mismas en dos situaciones: frente al cumplimiento de las demás hipótesis y frente al incumplimiento de cada una, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 31 y 32, respectivamente.

Figura 72. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 1

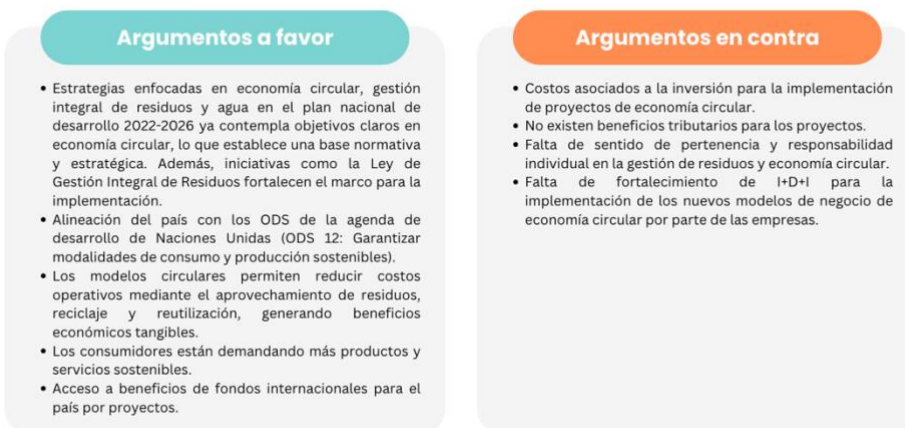
Hipótesis 1. Innovación tecnológica: ¿Qué tan probable es que en el año 2040 la participación de las energías alternativas en la matriz energética de Colombia supere el 20%, impulsada por el crecimiento de las inversiones en innovación tecnológica y la reducción progresiva de costos en energías renovables? Teniendo en cuenta que a marzo del 2024 la participación de renovables es del 3% (solar).



Fuente: Elaboración propia

Figura 73. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 2

Hipótesis 2. Nuevos modelos de negocio circulares: ¿Qué tan probable es que en el año 2040 Colombia alcance una alta adopción e implementación de nuevos modelos de negocios circulares? Teniendo en cuenta que en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 se planteó el objetivo de contar con un enfoque de economía circular, así como con leyes y políticas nacionales orientadas a la Gestión Integral de Residuos, Producción y Consumo Responsable, y Tratamiento de Aguas Residuales Industriales con objetivos específicos de reducción de emisiones de metano y aprovechamiento energético.



Fuente: Elaboración propia

Figura 74. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 3

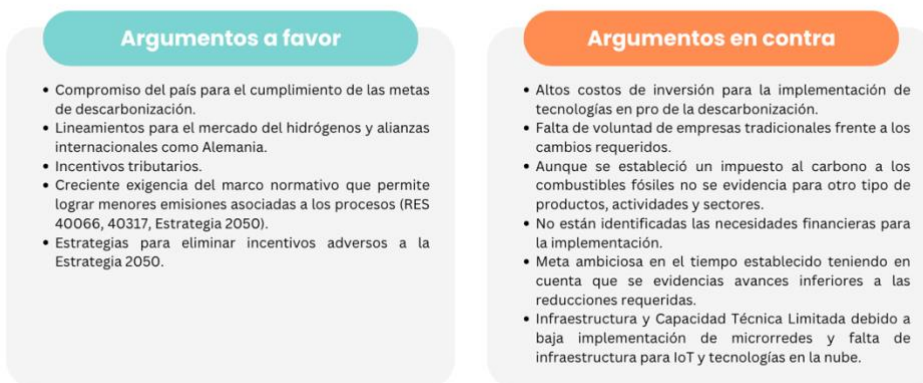
Hipótesis 3. Negociaciones entre actores clave: ¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia cuente con una alta interoperabilidad en su sistema energético, con capacidades de respuesta de la red mejoradas, una flexibilidad optimizada en la gestión de recursos distribuidos y el inicio de automatización y control avanzados, mediante una transformación digital progresiva que integre inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IOT) y tecnologías de redes inteligentes? Teniendo en cuenta que actualmente es incipiente en Colombia y se encuentra en una fase inicial con una baja implementación de microrredes eléctricas con sistemas de comunicaciones que aborde tecnologías emergentes como las IoT y la nube.



Fuente: Elaboración propia

Figura 75. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 4

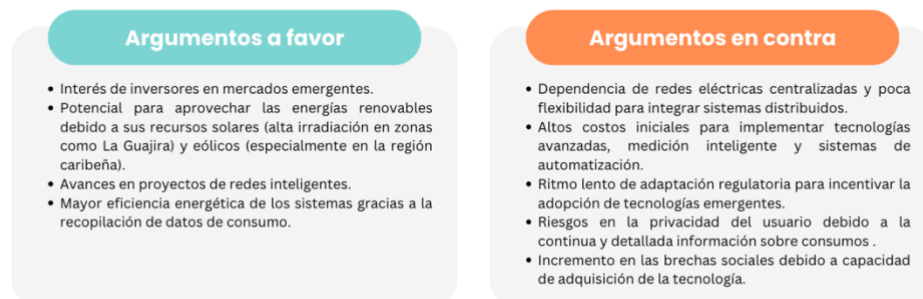
Hipótesis 4. Huella de carbono: ¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia logre reducir el 80% de sus emisiones de gases de efecto invernadero? Teniendo en cuenta que para el año 2018 se emitieron 302.9 MtonCO₂eq y que la meta del país es reducir el 51 % las emisiones de GEI al 2030 y alcanzar la carbono neutralidad al 2050.



Fuente: Elaboración propia

Figura 76. Argumentos a favor y en contra Hipótesis 5

Hipótesis 5. Interoperabilidad de los sistemas energéticos: ¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia cuente con una alta interoperabilidad en su sistema energético, con capacidades de respuesta de la red mejoradas, una flexibilidad optimizada en la gestión de recursos distribuidos y el inicio de automatización y control avanzados, mediante una transformación digital progresiva que integre inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IOT) y tecnologías de redes inteligentes en etapas estratégicas? Teniendo en cuenta que actualmente es incipiente en Colombia y se encuentra en una fase inicial con una baja implementación de microrredes eléctricas con sistemas de comunicaciones que aborde tecnologías emergentes como las IoT y la nube.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. En caso de que se cumpla

Hipótesis	H1. Innovación	H2. E.C.	H3. Actores	H4. Huella CO2	H5. Interoperabilidad
H1. Innovación: ¿Qué tan probable es que en el año 2040 la participación de las energías alternativas en la matriz energética de Colombia supere el 20%, impulsada por el crecimiento de las inversiones en innovación tecnológica y la reducción progresiva de costos en energías renovables? Teniendo en cuenta que a marzo del 2024 la participación de renovables es del 3.6% (eólica y solar).	0,6	0,6	0,8	0,8	0,6
H2. E.C: ¿Qué tan probable es que en el año 2040 Colombia alcance una alta adopción e implementación de nuevos modelos de negocios circulares? Teniendo en cuenta que en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 se planteó el objetivo de contar con un enfoque de economía circular, así como con leyes y políticas nacionales orientadas a la Gestión Integral de Residuos, Producción y Consumo Responsable, y Tratamiento de Aguas Residuales Industriales con objetivos específicos de reducción de emisiones de metano y aprovechamiento energético.	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7
H3. Actores: ¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia cuente con un alto comportamiento de negociaciones entre actores? Teniendo en cuenta que actualmente se han establecido alianzas para fomentar la transición energética como la Mesa de Transición Energética Justa del Sistema Nacional de Cooperación Internacional, Alianza por el Clima y la Transición Energética Justa entre Colombia y Alemania, Mesa Sectorial de Transición Energética de la Cámara de Comercio Colombo-Alemana (AHK Colombia), Alianza Energética 2030, entre otras.	0,9	0,8	0,7	0,9	7,0
H4. Huella CO2: ¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia logre reducir el 80% de sus emisiones de gases de efecto invernadero? Teniendo en cuenta que para el año 2018 se emitieron 302.9 MTonCO2eq y que la meta del país es reducir el 51 % las emisiones de GEI al 2030 y alcanzar la carbono neutralidad al 2050.	0,7	0,6	0,8	0,6	0,6
H5. Interoperabilidad: ¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia cuente con una alta interoperabilidad en su sistema energético, con capacidades de respuesta de la red mejoradas, una flexibilidad optimizada en la gestión de recursos distribuidos y el inicio de automatización y control avanzados, mediante una transformación digital progresiva que integre inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IOT) y tecnologías de redes inteligentes en etapas estratégicas? Teniendo en cuenta que actualmente es incipiente en Colombia y se encuentra en una fase inicial con una baja implementación de microrredes eléctricas con sistemas de comunicaciones que aborde tecnologías emergentes como las IoT y la nube.	0,6	0,5	0,7	0,5	0,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. En caso de que NO se cumpla

Hipótesis	H1. Innovación	H2. E.C.	H3. Actores	H4. Huella CO2	H5. Interoperabilidad
H1. Innovación: ¿Qué tan probable es que en el año 2040 la participación de las energías alternativas en la matriz energética de Colombia supere el 20%, impulsada por el crecimiento de las inversiones en innovación tecnológica y la reducción progresiva de costos en energías renovables? Teniendo en cuenta que a marzo del 2024 la participación de renovables es del 3.6% (eólica y solar).	0,6	0,5	0,4	0,3	0,6
H2. E.C: ¿Qué tan probable es que en el año 2040 Colombia alcance una alta adopción e implementación de nuevos modelos de negocios circulares? Teniendo en cuenta que en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 se planteó el objetivo de contar con un enfoque de economía circular, así como con leyes y políticas nacionales orientadas a la Gestión Integral de Residuos, Producción y Consumo Responsable, y Tratamiento de Aguas Residuales Industriales con objetivos específicos de reducción de emisiones de metano y aprovechamiento energético.	0,4	0,6	0,4	0,4	0,5
H3. Actores: ¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia cuente con un alto comportamiento de negociaciones entre actores? Teniendo en cuenta que actualmente se han establecido alianzas para fomentar la transición energética como la Mesa de Transición Energética Justa del Sistema Nacional de Cooperación Internacional, Alianza por el Clima y la Transición Energética Justa entre Colombia y Alemania, Mesa Sectorial de Transición Energética de la Cámara de Comercio Colombo-Alemana (AHK Colombia), Alianza Energética 2030, entre otras.	0,6	0,5	0,7	0,5	0,6
H4. Huella CO2: ¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia logre reducir el 80% de sus emisiones de gases de efecto invernadero? Teniendo en cuenta que para el año 2018 se emitieron 302.9 MtonCO2eq y que la meta del país es reducir el 51 % las emisiones de GEI al 2030 y alcanzar la carbono neutralidad al 2050.	0,3	0,6	0,4	0,6	0,6
H5. Interoperabilidad: ¿Qué tan probable es que al año 2040 Colombia cuente con una alta interoperabilidad en su sistema energético, con capacidades de respuesta de la red mejoradas, una flexibilidad optimizada en la gestión de recursos distribuidos y el inicio de automatización y control avanzados, mediante una transformación digital progresiva que integre inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IOT) y tecnologías de redes inteligentes en etapas estratégicas? Teniendo en cuenta que actualmente es incipiente en Colombia y se encuentra en una fase inicial con una baja implementación de microrredes eléctricas con sistemas de comunicaciones que aborde tecnologías emergentes como las IoT y la nube.	0,3	0,5	0,3	0,4	0,5

Fuente: Elaboración propia

7.3.2 Probabilidades corregidas y núcleo tendencial

Con base en los valores de probabilidades cruzadas obtenidas anteriormente como resultado de la evaluación realizada por los expertos, se brindó esta información como insumo al software SMIC, el cual procesa todas las probabilidades cruzadas y brinda unas probabilidades corregidas para cada hipótesis, resumidas en la Figura 77.

Figura 77. Resultados de las hipótesis con sus probabilidades evaluadas



Fuente: Elaboración propia

A partir de las probabilidades corregidas se define un sistema binario, con el fin de obtener posteriormente múltiples escenarios con combinaciones del cumplimiento o incumplimiento de cada hipótesis, bajo el criterio de que si es mayor al 50% es “1” (cumple) y si es menor al 50% es “0” (no cumple), como se muestra en la Tabla 33. De esta manera, se logra evidenciar el escenario probable, tendencial o el “para donde vamos”, que en este caso muestra el logro de todas las hipótesis pero con una tendencia en general “débil”, lo que indica que es un escenario altamente vulnerable a los cambios del entorno.

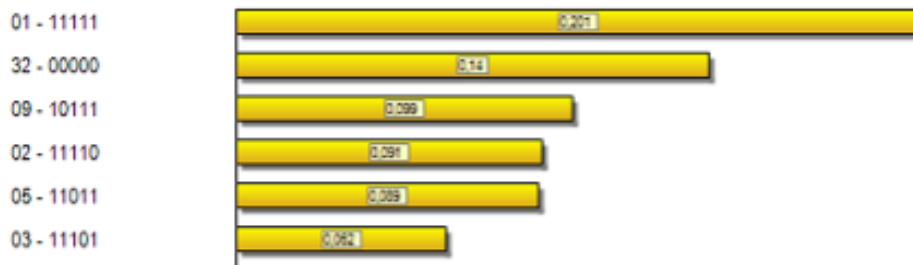
Tabla 33. Probabilidades corregidas y sistema binario

Hipótesis	Probabilidades	Si es > 0,5 es 1 Si es <0,5 es 0	Muy fuerte	Fuerte	Moderada	Débil	Muy débil	Duda	Improbable
			>90	<90>80	<70>80	<60>70	<60>50	50	<50
Innovación	0,67	1				X			
E.C.	0,619	1				X			
Actores	0,669	1				X			
Huella CO2	0,71	1			X				
Interoperabilidad	0,566	1				X			

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, el SMIC toma el sistema binario obtenido y como resultado suministra diferentes combinaciones con nuevas calificaciones de probabilidad para múltiples escenarios, ordenándolos de mayor a menor según su probabilidad de ocurrencia (Figura 78). A cada uno de estos escenarios se le asigna un nombre representativo de acuerdo el cumplimiento o no de las hipótesis planteadas para cada variable estratégica.

Figura 78. Histograma de escenarios con mayor probabilidad (núcleo tendencial)



Fuente: Elaboración propia mediante SMIC

Tabla 34. Representación de los escenarios con respecto a las variables en el sistema binario

No. Escenario	H1	H2	H3	H4	H5	Nombre Escenario
Escenario 1	1	1	1	1	1	Escenario probable: Sin brillo, pero cumplido
Escenario 0	0	0	0	0	0	Correr no es llegar
Escenario 2	1	0	1	1	1	Faltó un centavo para el peso
Escenario 3	1	1	1	1	0	Una orquesta sin director
Escenario 4	1	1	0	1	1	Cada quien por su lado
Escenario 5	1	1	1	0	1	Una fiesta sin torta

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el histograma de la Figura 78, se define el *núcleo tendencial* a partir del acumulado de las probabilidades corregidas obtenidas, el cual en condiciones donde se presentan tendencias de probabilidades “moderadas” a “muy fuertes” se maneja hasta probabilidades acumuladas del 80% o 90%. Sin embargo, en este caso las probabilidades son “débiles” (considerando que la mayor es solo del 20%), por tanto se define el núcleo tendencial de escenarios hasta una probabilidad acumulada del 68%.

En la Figura 79 se plasma, de manera más visual, los escenarios del el núcleo tendencial con sus probabilidades de ocurrencia y probabilidad acumulada, en donde se puede evidenciar que el escenario más probable es el “11111”, con una probabilidad del 20,1%, conformado por un cumplimiento de todas las hipótesis planteadas para las variables. Los otros escenarios, exceptuando el “00000” que es uno cual no se espera llegar, serán monitoreados dentro del *plan vigía* presentado más adelante.

Figura 79. Probabilidades de ocurrencia y acumuladas de los escenarios



Fuente: Elaboración propia

7.3.4 Plan vigía

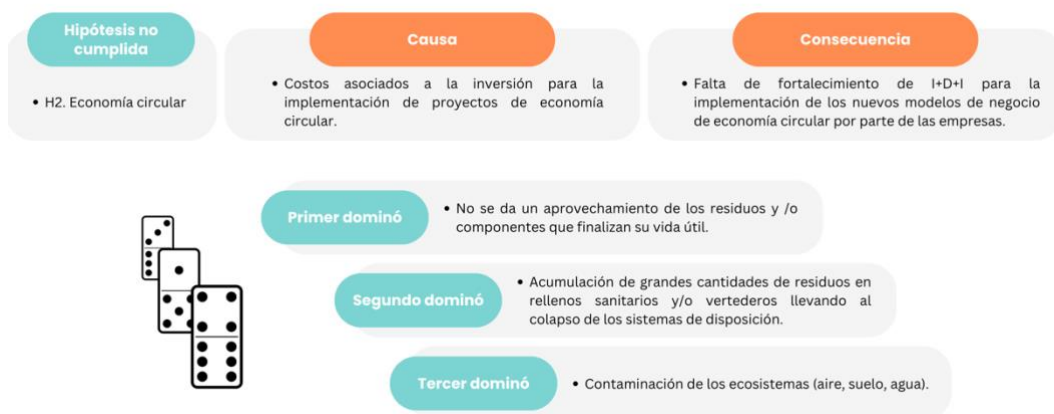
Este Plan tiene como objetivo monitorear de manera sistemática las variables estratégicas que, en cada escenario, presentan un riesgo de no cumplirse, analizando sus causas y consecuencias para anticipar impactos y tomar decisiones correctivas oportunas. A través de este seguimiento, se busca garantizar que la trayectoria hacia el *escenario apuesta* se mantenga alineada con los objetivos estratégicos, permitiendo la adaptación a cambios inesperados en el entorno.

Para ello, se selecciona la o las hipótesis que no se cumplen en cada escenario a monitorear: (i) Faltó un centavo para el peso, (ii) Una orquesta sin director, (iii) Cada quien por su lado, y (iv) Una fiesta sin torta, se establecen las posibles causas y

respectiva cadena o “dominó” de consecuencias asociada a dicho incumplimiento, como se presenta en las Figuras 80-83. Como resultado, se obtiene lo siguiente:

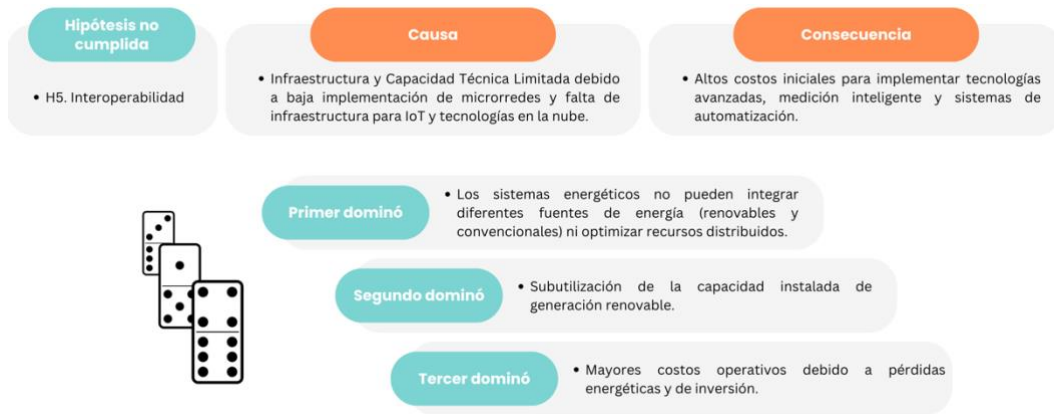
- En el escenario “Faltó un centavo para el peso” no se cumple la hipótesis 2 asociada a la variable *nuevos modelos de economía circular*, esto implica que el vigía debe estar atento a Finalización del ciclo de vida de los componentes tecnológicos asociados a los nuevos sistemas de energía implementados (aprovechamiento y/o disposición final).
- En el escenario “Una orquesta sin director” no se cumple la hipótesis 5 asociada a la variable *interoperabilidad de los sistemas energéticos*, razón por la cual es relevante monitorear las eficiencias asociadas al sistema energético integrado (% energía útil / consumo total de energía total).
- En el escenario “Cada quien por su lado” no se cumple la hipótesis 3 asociada a la variable *negociaciones entre actores clave*, por tanto, se deberá hacer seguimiento a la generación de nuevos vehículos comerciales, políticos y económicos en el país para viabilizar los avances de la transición energética.
- En el escenario “Una fiesta sin torta” no se cumple la hipótesis 4 asociada a la variable *huella de carbono*, reflejando la importancia de un riguroso monitoreo a la implementación de medidas de mitigación y adaptación de cambio climático en el país.

Figura 80. Dominó consecuencias escenario “Faltó un centavo para el peso”



Fuente: Elaboración propia

Figura 81. Dominó consecuencias escenario “Una orquesta sin director”



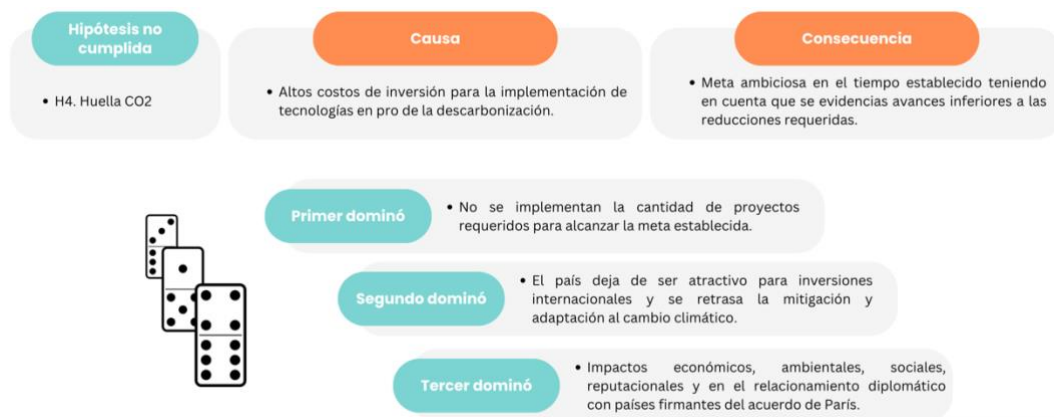
Fuente: Elaboración propia

Figura 82. Dominó consecuencias escenario “Cada quien por su lado”



Fuente: Elaboración propia

Figura 83. Dominó consecuencias escenario “Una fiesta sin torta”



Fuente: Elaboración propia

Capítulo 8. Estrategias

Una vez reconocido el escenario apuesta, se requiere construir ese futuro. Para lograrlo empleamos las *estrategias*. Una estrategia se define como la “sumatoria de un objetivo y unas acciones”. Los objetivos provienen necesariamente de las hipótesis del escenario elegido como deseable.

El diseño de estas estrategias requiere una visión alineada al horizonte 2040, garantizando que las decisiones tomadas hoy sean relevantes y efectivas en los escenarios del futuro. Este enfoque implica identificar y priorizar proyectos innovadores que integren tecnologías emergentes como el hidrógeno verde, la captura directa de carbono, las redes inteligentes, los gemelos digitales y la inteligencia artificial, en conjunto con principios de justicia social, equidad territorial y sostenibilidad ambiental.

Asimismo, estas estrategias deben responder a las dinámicas globales y locales, adaptando casos de éxito internacionales y mejores prácticas a las particularidades del contexto colombiano. Esto incluye superar barreras regulatorias, atraer inversiones estratégicas y fomentar la participación activa de comunidades y actores clave para lograr una transición justa e inclusiva.

Tabla 35. Estrategias propuestas

Variable Estratégica	Estrategia
Negociación entre actores	Programa nacional de consenso y cooperación energética
Compromiso del sector empresarial	Programa Nacional de Sostenibilidad Empresarial Certificada
Innovación tecnológica	Programa Nacional de Innovación Tecnológica y Transición Energética
Interoperabilidad de los sistemas energéticos	Programa Nacional de Interoperabilidad Energética y Exportación Renovable
Nuevos modelos de negocio circulares	Programa Nacional de Economía Circular para la Sostenibilidad Energética
Huella de carbono	Programa Nacional para la Resiliencia Climática y la Transición hacia Cero Emisiones

Fuente: Elaboración propia

8.1 Programas

8.1.1 Programa nacional de consenso y cooperación energética

Variable estratégica asociada. Negociación entre actores.

Objetivo. Alcanzar el consenso y la coordinación efectiva entre los sectores público, privado y las comunidades, así como con países líderes en transición energética.

Proyectos:

1. Mesa Nacional de Concertación Energética (MNCE): Establecer una plataforma permanente de diálogo que incluya representantes del gobierno, empresas del sector energético, organizaciones de la sociedad civil, comunidades locales y grupos indígenas. Esta mesa se enfocará en resolver conflictos, promover intereses comunes y priorizar iniciativas conjuntas de transición energética. La plataforma usa herramientas digitales de participación ciudadana y simulaciones prospectivas para visualizar impactos de las decisiones.

2. Red de Cooperación Energética Internacional (RECI): Crear una red internacional con países líderes en transición energética (como Alemania, Dinamarca, Japón y Chile) para negociar acuerdos de transferencia tecnológica, financiamiento climático y programas de capacitación técnica. Se plantea el desarrollo de un índice de cooperación energética internacional que mida el progreso en la implementación de acuerdos y facilite su seguimiento.

3. Observatorio de Gobernanza Energética (OGE): Implementar un observatorio que evalúe la calidad de la gobernanza energética en Colombia, midiendo indicadores como transparencia, participación y cumplimiento de acuerdos internacionales apoyado en inteligencia artificial para identificar patrones de mejora y posibles conflictos. Este observatorio producirá informes anuales y recomendaciones para mejorar la coordinación intersectorial.

4. Academia Nacional de Negociación Energética: Crear un centro de formación especializado en negociación energética internacional y gestión de conflictos, dirigido a funcionarios públicos, líderes comunitarios y empresarios. Este centro ofrecerá programas en transferencia de tecnología, acceso a financiamiento climático y

construcción de consensos. El centro tendrá la capacidad de usar simulaciones avanzadas y realidad virtual para prácticas de negociación en escenarios internacionales.

8.1.2 Programa Nacional de Sostenibilidad Empresarial Certificada

Variable estratégica asociada. Compromiso del sector empresarial.

Objetivo. Promover la adopción masiva y certificación con estándares internacionales de prácticas sostenibles en el sector empresarial colombiano.

Proyectos:

1. Sello Colombiano de Sostenibilidad Empresarial: Desarrollo y promoción del Sello de Sostenibilidad Empresarial avalado por ICONTEC, alineado con estándares internacionales como ISO 14001, ISO 50001 y las Directrices de la OCDE para empresas multinacionales. El programa brindará acompañamiento técnico y financiero a empresas que busquen certificarse. EL proyecto desarrolla una plataforma digital para autodiagnóstico y seguimiento del progreso hacia la certificación.

2. Ruta hacia el Índice de Sostenibilidad Dow Jones: Crear un programa específico de mentoría y apoyo técnico para que empresas colombianas logren los criterios necesarios para su inclusión en el índice de sostenibilidad Dow Jones Latinoamérica. Esto incluye formación en reporte de sostenibilidad (GRI, SASB) y auditorías externas. Implementa simuladores de impacto empresarial para evaluar cómo las decisiones estratégicas influyen en los criterios del índice.

3. Alianza Nacional por la Sostenibilidad Empresarial (ANSE): Formación de una alianza público-privada entre gremios empresariales, el gobierno y organismos internacionales, para impulsar el compromiso del sector privado con la sostenibilidad. ANSE fomentará la cofinanciación de proyectos sostenibles y la transferencia de conocimientos y utilizará blockchain para garantizar la transparencia en los compromisos y el impacto de los proyectos.

Escuela de Liderazgo Empresarial Sostenible: Desarrollo de un centro educativo especializado en liderazgo empresarial sostenible, que capacite a ejecutivos y equipos gerenciales en sostenibilidad corporativa, medición de impacto y reporte bajo estándares globales.

8.1.3 Programa Nacional de Innovación Tecnológica y Transición Energética

Variable estratégica asociada. Innovación tecnológica.

Objetivo. Desarrollar una matriz energética segura, resiliente y diversificada con nuevas tecnologías eficientes y de bajas emisiones en el sector energético, habilitada por un incremento en la interdependencia tecnológica.

Proyectos:

1. Red Nacional de Energías Renovables Resilientes: Establecimiento de una red integrada de generación y almacenamiento basada en FNCER (solar, eólica, geotérmica) y tecnologías avanzadas de almacenamiento como hidráulica por bombeo, almacenamiento térmico y sistemas de hidrógeno. El alcance incluye la integración de inteligencia artificial para la gestión predictiva de la red y optimización de la generación distribuida.

2. Cadena Local de Innovación Tecnológica Energética: Desarrollo de capacidades industriales nacionales y regionales para la producción de paneles solares, baterías avanzadas de litio y turbinas eólicas, fomentando la economía circular y la reducción de la dependencia de importaciones tecnológicas.

3. Sistemas de Captura y Almacenamiento de Carbono: Instalación de sistemas CCUS (Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono) en sectores estratégicos, como la generación térmica y la industria pesada. Además, se desarrollará infraestructura para transportar y almacenar CO₂ en yacimientos seguros.

4. Plataforma de Colaboración Tecnológica Energética: Creación de una plataforma digital que conecte a empresas, universidades y centros de investigación para fomentar la colaboración en el desarrollo y prueba de nuevas tecnologías energéticas. La plataforma facilitará el acceso a financiamiento y permitirá el intercambio de conocimientos, incorporará simulaciones virtuales y gemelos digitales para validar prototipos en entornos controlados antes de su implementación a gran escala.

8.1.4 Programa Nacional de Interoperabilidad Energética y Exportación Renovable

Variable estratégica asociada. Interoperabilidad de los sistemas energéticos.

Objetivo. Consolidar un sistema energético optimizado, equitativo y resiliente que garantice un suministro eficiente a nivel nacional, promueva la participación activa

de múltiples actores y facilite interconexiones estratégicas internacionales para la exportación de superávit energético renovable.

Proyectos:

1. Red Nacional Inteligente de Energía: Implementación de redes inteligentes (Smart Grids) en el sistema energético nacional para optimizar la generación, distribución y consumo energético. Estas redes permitirán una integración eficiente de tecnologías como energías renovables, almacenamiento avanzado y gestión dinámica de demanda.

2. Conexión Energética Internacional Estratégica: Desarrollo de infraestructura y acuerdos estratégicos para interconexiones internacionales que permitan exportar el superávit de energía renovable hacia mercados clave en América Latina y el Caribe. Esto incluirá líneas de transmisión transfronterizas y sistemas de regulación energética compatibles.

3. Democratización Energética para la Equidad: Creación de programas y tecnologías que garanticen un suministro energético equitativo y de calidad en comunidades rurales y urbanas vulnerables, incluyendo el acceso a tarifas justas y sistemas descentralizados de generación renovable (microrredes comunitarias).

4. Plataforma Nacional de Integración de Actores Energéticos: Desarrollo de una plataforma digital interoperable para integrar actores del sistema energético nacional, incluyendo empresas generadoras, distribuidores, reguladores, prosumidores y consumidores finales. La plataforma facilitará transacciones energéticas, gestión de excedentes y participación en mercados internacionales.

8.1.5 Programa Nacional de Economía Circular para la Sostenibilidad Energética

Variable estratégica asociada. Nuevos modelos de negocio circulares.

Objetivo. Transformar las cadenas de valor tradicionales en cadenas sostenibles mediante la adopción de nuevos modelos de negocio circulares, impulsando la reutilización de materiales, el diseño ecoeficiente, la valorización de residuos y la integración de productos como servicios.

Proyectos:

1. Red Nacional de Recuperación y Reutilización de Materiales Críticos: Implementación de una red integrada para la recolección, clasificación y recuperación

de materiales críticos (como litio, cobalto y tierras raras) empleados en baterías, paneles solares y aerogeneradores. Esta red conectará industrias, recicladores y laboratorios de innovación para maximizar la reutilización.

2. Diseño Modular para la Transición: Promoción de diseños modulares y ecoeficientes en productos energéticos, como inversores solares y turbinas eólicas, para extender su vida útil y facilitar su desensamblaje y reciclaje al final de su ciclo de vida.

3. Bioindustrias para la Valorización de Residuos: Desarrollo de bioindustrias locales que utilicen tecnologías avanzadas (biorefinerías, gasificación y pirolisis) para convertir residuos industriales y agrícolas en biocombustibles, bioplásticos y fertilizantes.

4. Plataforma Nacional de Productos como Servicios: Creación de una plataforma digital para facilitar la adopción de modelos de negocio basados en productos como servicios en sectores estratégicos, como el energético (leasing de paneles solares, baterías de respaldo) y la manufactura (mantenimiento predictivo y uso compartido).

8.1.6 Programa Nacional para la Resiliencia Climática y la Transición hacia Cero Emisiones

Variable estratégica asociada: Huella de carbono.

Objetivo: Fortalecer la resiliencia climática de Colombia mediante la mitigación de los efectos del cambio climático y la reducción del 80% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para 2040.

Proyectos:

1. Sistemas de Captura Directa de Carbono Atmosférico: Instalación de infraestructuras de captura directa de carbono atmosférico en áreas estratégicas del país para remover hasta 10 millones de toneladas de CO₂ al año. El carbono capturado se destinará a la producción de materiales avanzados como grafeno y bioplásticos.

2. Plataforma Nacional de Datos Climáticos y de Carbono: Creación de una plataforma nacional basada en big data y aprendizaje automático para integrar datos de emisiones, resiliencia climática y recursos naturales. Esto permitirá generar reportes

automatizados para el Sistema MRV y RENARE, además de alertas climáticas en tiempo real.

3. Biofábricas de Secuestro de Carbono: Implementación de biofábricas flotantes en ríos y lagos que utilizan algas genéticamente modificadas para absorber CO₂ y producir biocombustibles avanzados y fertilizantes orgánicos.

4. Infraestructura Verde Inteligente para Ciudades Resilientes: Desarrollo de infraestructuras urbanas verdes como techos vivos, pavimentos fotovoltaicos y sistemas de captación hídrica, todos conectados a un sistema central de inteligencia climática.

5. Agricultura Climáticamente Inteligente 4.0: Introducción de drones autónomos, sensores IoT y tecnologías de aprendizaje automático para optimizar el uso de agua, insumos agrícolas y energía, reduciendo las emisiones del sector agrícola.

Capítulo 9. Conclusiones y Recomendaciones

El presente estudio prospectivo estratégico sobre la transición energética en Colombia al 2040 revela la importancia de una planificación de largo plazo basada en escenarios que permitan anticipar desafíos y oportunidades en la transformación del sector energético. La metodología aplicada ha permitido identificar factores de cambio clave, tendencias emergentes y actores estratégicos que influirán en la evolución del sistema energético colombiano. En particular, el estudio identificó las variables estratégicas que influirán en la transición, evidenciando que la innovación tecnológica, la interoperabilidad de los sistemas energéticos, el compromiso del sector empresarial, las negociaciones entre actores clave, la reducción de huella de carbono y la transición hacia modelos de negocio circulares, son pilares fundamentales para acelerar la transición energética en el país.

Desde la perspectiva de los actores estratégicos, el estudio resalta la necesidad de una gobernanza colaborativa entre el gobierno, la industria y la sociedad civil para garantizar que las políticas y regulaciones faciliten la inversión en energías renovables, almacenamiento de energía y electrificación del transporte. Se destaca también la relevancia de establecer incentivos financieros y mecanismos de financiamiento sostenible para proyectos de transición energética, especialmente aquellos que integren nuevas tecnologías como el hidrógeno verde, la captura de carbono y las redes inteligentes o *smartgrids*.

Los escenarios construidos permiten visualizar diferentes futuros posibles para la transición energética en el país. En el escenario de “Oportunidad perdida”, se observa una adopción fragmentada de tecnologías limpias, con una implementación desigual entre regiones y sectores económicos. En contraste, el escenario “Crear es crear” plantea una transformación estructural con una matriz energética diversificada y una mayor participación de fuentes renovables, impulsada por políticas públicas coherentes y un ecosistema empresarial comprometido. Finalmente, el escenario “Prometeo” representa la versión más optimista, en la que Colombia se posiciona como líder regional en transición energética, exportando energía renovable y tecnologías sostenibles. Como resultado de las valoraciones realizadas los expertos, se definió como *escenario apuesta*

“Crear es crear”, considerando que su planteamiento representa un panorama coherente, viable y gobernable, permitiendo al país tener capacidad de acción para lograrlo.

Para la toma de decisiones informada, el estudio sugiere la implementación de estrategias que fomenten modelos de negocio circulares, mejoren la interoperabilidad de los sistemas energéticos y promuevan la reducción de la huella de carbono en toda la cadena de valor. Esto permitirá dinamizar y fortalecer el desarrollo de la transición energética, tanto para el sector empresarial como para el gobierno.

Adicionalmente, se resalta la importancia de integrar mecanismos de inteligencia competitiva y vigilancia tecnológica que permitan monitorear avances globales y adaptar innovaciones al contexto colombiano. La vigilancia tecnológica permitió evidenciar importantes avances en la producción científica y el desarrollo de nuevas tecnologías limpias, lo que demuestra que el mundo se está moviendo rápidamente hacia sistemas energéticos más eficientes y sostenibles. Esto resalta la necesidad de que Colombia no solo observe estos cambios, sino que también se rete a adoptar y escalar tecnologías de energías renovables ya conocidas y probadas, incluso si no corresponden a las invenciones más recientes. Si el país no avanza en la incorporación de estas tecnologías, se profundizará su rezago tecnológico, afectando su competitividad y capacidad de adaptación en un mercado energético global cada vez más dinámico. Por ello, resulta clave establecer políticas y estrategias que faciliten la transferencia tecnológica, incentiven la inversión en infraestructura moderna y promuevan la formación de talento especializado, asegurando que la transición energética colombiana no solo responda a los desafíos ambientales, sino que también potencie la innovación y el desarrollo económico del país.

Desde una perspectiva de prospectiva territorial, se concluye que es relevante y necesario diseñar estrategias diferenciadas para las diversas regiones del país, de acuerdo con sus características socioeconómicas y su potencial energético. Esto permitirá avanzar en la descentralización de la generación, el aprovechamiento de recursos energéticos locales y la democratización del acceso a la energía. La promoción de comunidades energéticas y modelos de autogeneración facilitará la integración de fuentes renovables y reducirá vulnerabilidades asociadas al cambio climático. En este sentido, se recomienda fortalecer la infraestructura de transmisión y almacenamiento,

promoviendo la resiliencia del sistema eléctrico y asegurando un acceso equitativo a la energía limpia en todo el territorio nacional.

Sin embargo, lograr esta descentralización energética requiere ir más allá de las regiones que hacen parte del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y dar visibilidad a las zonas aisladas, donde la dependencia de diésel, leña y equipos ineficientes genera no solo impactos ambientales y problemas de salud, sino también altos costos fiscales en subsidios para el país. La transición energética debe priorizar también soluciones adaptadas a estos territorios, como microrredes eléctricas híbridas con almacenamiento, acceso a tecnologías eficientes y modelos de electrificación sostenible, reduciendo la brecha energética y disminuyendo la carga fiscal del Estado.

Además, para que la implementación de nuevas tecnologías en estas zonas sea realmente efectiva y sostenible en el tiempo, es fundamental el involucramiento activo de las comunidades. Esto implica no solo que conozcan la importancia y los beneficios de las soluciones energéticas adoptadas, sino que también sean capacitadas para el fortalecimiento de conocimientos y capacidades técnicas en la región, asegurando que puedan participar en el mantenimiento y monitoreo continuo del desempeño de los sistemas energéticos. De esta manera, se evita que las infraestructuras energéticas queden en el abandono después de su implementación y se fomenta un modelo de autogestión energética, garantizando que estas soluciones sean viables, operativas y sostenibles a largo plazo. Integrar estos territorios al proceso de transición, con un enfoque de sostenibilidad y apropiación comunitaria, no solo garantizará equidad en el acceso a la energía, sino que también contribuirá a la reducción de emisiones y al desarrollo de economías locales resilientes, consolidando un sistema energético más justo e inclusivo para el país.

Sin embargo, aun considerando tomar acción frente a los factores mencionados y la implementación de estrategias entorno a los mismos, el cumplimiento de las metas de transición energética y sostenibilidad en Colombia al 2040 representa significativos retos que difícilmente se pueden abordar solo a través de la transformación del sector eléctrico. Si bien la diversificación de la matriz eléctrica del país mediante la incorporación de fuentes renovables no convencionales es un paso fundamental, la reducción significativa de emisiones y el avance hacia un modelo sostenible requieren la

integración de sectores estratégicos altamente contaminantes, cuyos retos representan barreras críticas para la descarbonización.

El sector energético, visto no solo desde la generación de electricidad, aún depende de fuentes fósiles como termoeléctricas a carbón y gas, que requieren estrategias de sustitución mediante tecnologías menos contaminantes para minimizar su impacto ambiental. Además, en zonas rurales, una proporción significativa de la población aún depende de energéticos con altas emisiones como la leña y el carbón para la cocción de alimentos y calefacción. Por otro lado, el sector AFOLU (agricultura, silvicultura y otros usos del suelo) es el mayor emisor de GEI en Colombia, principalmente por la deforestación y las emisiones de metano de la ganadería, lo que exige modelos productivos sostenibles y una mejor gestión de fertilizantes y residuos. El transporte, como principal consumidor de combustibles fósiles, enfrenta el reto de electrificación, adopción de biocombustibles y expansión de infraestructura requerida para lograr un mayor aporte en descarbonización. La industria y manufactura, en sectores como el cemento, acero y minería, requiere considerar tecnologías de captura de carbono y eficiencia energética. La gestión de residuos tiene mayor oportunidad en la implementación de modelos de economía circular y valorización energética para reducir emisiones de metano.

Cabe resaltar, que el gas natural juega un papel estratégico en la transición energética de Colombia, tanto como combustible de respaldo en la generación eléctrica como en sectores industriales y residenciales. Si bien su uso contribuye a la reducción de emisiones en comparación con el carbón y el diésel, su carácter fósil y su impacto en las emisiones de metano limitan su viabilidad como una solución a largo plazo. En el corto y mediano plazo, el gas natural seguirá siendo un *facilitador* de la transición, especialmente en sectores difíciles de electrificar, como la industria y el transporte pesado, y en la sustitución de combustibles más contaminantes en zonas rurales y urbanas.

La prospectiva estratégica aplicada a la transición energética en Colombia al 2040 proporciona herramientas valiosas para orientar políticas públicas y decisiones estratégicas en un entorno dinámico. La articulación entre actores, la adopción de tecnologías emergentes y la implementación de modelos de negocio sostenibles serán determinantes para construir un sistema energético más eficiente, equitativo y resiliente.

Referencias Bibliográficas

- AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA. *Glosario Minero*.
<https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEOS Y GAS. Tendencias de inversión en exploración y producción (e&p) de petróleo y gas en Colombia 2022 y perspectivas 2023. Disponible en: <https://acp.com.co/portal/wp-content/uploads/2023/02/TENDENCIAS-DE-INVERSION-EN-EXPLORACION-Y-PRODUCCION-EP-DE-PETROLEO-Y-GAS-EN-COLOMBIA-2022-Y-PERSPECTIVAS-2023.pdf>
- AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA. Coal Overview 2023.
<https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal#tracking>
- AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. *Informe de recursos y reservas con corte diciembre de 2022, insumo para la Transición Energética Justa en Colombia*. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/es/noticias/informe-de-recursos-y-reservas-con-corte-diciembre-de-2022-insumo-para-la-transici%C3%B3n-energ%C3%A9tica-justa-en-colombia/>
- ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA COLOMBIANA. (2020, April 9). Proyecto UNESCO de geotermia será liderado por Colombia – Asociación Geotérmica Colombiana. AGEOCOL. <https://www.ageocol.org/unesco-igcp636>
- ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA COLOMBIANA. (n.d.). Explora Geotermia – Asociación Geotérmica Colombiana. AGEOCOL. <https://www.ageocol.org/explora-geotermia>
- Alfaro, C. M., Rueda Gutiérrez, J. B., Casallas Y. P., Rodríguez G. Z., y Malo J. E. (2020). Estimación Preliminar del Potencial Geotérmico de Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/742_2021EstiPrePotGeotColombia/Documento/Pdf/EstiPrePotenGeoterColom.pdf
- ASUNTOS LEGALES
<https://www.asuntoslegales.com.co/analisis/martin-gustavo-ibarra-402454/el-verde-y-azul-insumo-basico-para-la-reindustrializacion-de-colombia-3555770>

BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. Apalancando el crecimiento de la demanda de minerales y metales por la transición a una economía baja en carbono. Enero de 2022.

Banco Interamericano de Desarrollo. América latina y el caribe 2050. Convirtiéndose en un centro global de soluciones y metales bajos en carbono.

BANCO DE LAS AMÉRICAS. *Hidrógeno en Suramérica*
<https://www.bnamericas.com/es/reportajes/hidrogeno-verde-asi-avanza-america-latina-y-los-lideres-en-proyectos>

Bona, P., & Coviello, M. F. (2016, Abril). Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur. Repositorio CEPAL.
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40079/1/S1600390_es.pdf

CARBON BRIEF. (diciembre 5, 2023). Emisiones mundiales de CO2 de 1995 a 2023 (en miles de millones de toneladas métricas) [Gráfica]. In Statista. Recuperado el 03 de febrero de 2024, de <https://es-statista-com.basesbiblioteca.uexternado.edu.co/estadisticas/635894/emisiones-mundiales-de-dioxido-de-carbono/>

Calvo, R., Arispe, S., García, J., Siroit, G., Ramírez, M., Gaviano, A., Larreamendy, P., Bornholdt, L., Goldenberg, F., & Gischler, C. (2022, Septiembre). ¿Cómo entender la energía bajo tus pies?: beneficios y gestión socioambiental efectiva de proyectos geotérmicos en América Latina y el Caribe. Publications.
<https://publications.iadb.org/es/como-entender-la-energia-bajo-tus-pies-beneficios-y-gestion-socioambiental-efectiva-de-proyectos>

CONPES 3934.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/conpes/econ%C3%B3micos/3934.pdf>

CONPES 3874 DE 2016 .
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>

CORFICOLOMBIANA “*Actualidad del sector energético colombiano*” 23 de febrero de 2023. Tomado de
<https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/Informe%20Sectorial>

%20Sector%20Electrico%2024012023%20VF.pdf/6f0862d8-aacb-40fd-cc3e-0c95916bceba

DNP “Plan Nacional de Desarrollo”. Tomado de <https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026>

Decreto 1476 de 2022

[https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30044559#:~:text=DECRETO%201476%20DE%202022&text=\(agosto%2003\)-,por%20el%20cual%20se%20reglamentan%20los%20art%C3%ADculos%2021%20y%2023,distribuci%C3%B3n%20y%20uso%20del%20hidr%C3%B3geno](https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30044559#:~:text=DECRETO%201476%20DE%202022&text=(agosto%2003)-,por%20el%20cual%20se%20reglamentan%20los%20art%C3%ADculos%2021%20y%2023,distribuci%C3%B3n%20y%20uso%20del%20hidr%C3%B3geno)

EL PAÍS. Éxtasis y martirio para el carbón colombiano. Disponible en: <https://elpais.com/economia/negocios/2023-03-08/extasis-y-martirio-para-el-carbon-colombiano.html>

ECOPETROL. (2023, March 8). Alianza entre Ecopetrol, Baker Hughes y CHEC para impulsar la energía geotérmica en Colombia. Ecopetrol. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/alianza-entre-ecopetrol-baker-hughes-y-chec-para-impulsar-la-energia-geotermica-en-colombia>

ENERGY INSTITUTE (2023) “Statistical Review of World Energy” 72^o edition, Tomado de <https://www.energyinst.org/statistical-review>

ENERGY INSTITUTE (2023) Statistical Review of world energy.

FORO ECONÓMICO MUNDIAL. *Fostering Effective Energy Transition 2023 Edition Insight Report* June 2023. Disponible en: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2023.pdf

Gómez, L. y Burgos, W. (2008). Actualización del Inventario de Posibilidades de Generación de Energía Mareomotriz en Colombia. Trabajo para optar al título de Ingeniero Electricista. Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Bogotá, citado por Quintero & Quintero, op.cit, p. 126.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (2023) Global Wind Energy Report. <https://gwec.net/>

GLOBAL ENERGY MONITOR. Tomado de
<https://globalenergymonitor.org/es/projects/global-nuclear-power-tracker>

Gehring, M., & Loksha, V. (2012, Junio). *Manual De Geotermia: Cómo Planificar y Financiar la Generación de Electricidad*. Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energético | Banco Mundial.

https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP_GEOTHERMAL_Spanish_book_Optimized.pdf

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Oil Market Report – July 2023*.
<https://www.iea.org/reports/oil-market-report-july-2023>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. El mercado de minerales críticos experimenta un crecimiento sin precedentes, ya que la demanda de energías limpias impulsa un fuerte aumento de la inversión. 11 julio de 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Critical Minerals Market Review 2023. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>

INDEPAZ
<https://indepaz.org.co/el-hidrogeno-verde-de-cualquier-color-por-camilo-gonzalez-posso/>

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA.(2022). Diálogo social para definir la hoja de ruta de la transición energética justa en Colombia. pdf. p.10

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 180102 del 30 de enero de 2012.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. (2023, Junio 8). Anuncio 17284 del BOE núm. 136 de 2023. BOE.es. <https://www.boe.es/boe/dias/2023/06/08/pdfs/BOE-B-2023-17284.pdf>

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA *Hoja de ruta TEJ*
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. *Hoja de ruta del Hidrógeno en Colombia*
https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf

https://www.minenergia.gov.co/documents/10439/2._Diagn%C3%B3stico_base_para_la_TEJ.pdf

https://www.minenergia.gov.co/documents/10440/2.a._Diagn%C3%B3stico_No_rmograma_-_Anexo.pdf

https://www.minenergia.gov.co/documents/10442/3._Escenarios_nacionales_TE_J._Rutas_que_nos_preparan_para_el_futuro.pdf

MASCOLOMBIA

<https://mascolombia.com/-gris-verde-y-azul-sabe-que-son-y-para-que-sirven/>

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Plan nacional de negocios verdes

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/11/Actualizacion-Plan-Nacional-Negocios-verdes-2022-2030.pdf>

Manwell, MCGowan & Rogers (2009) Wind Energy Explained: Theory, Design and Application <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119994367>

Mahmoud et al (2023) Renewable energy. Volume 1: solar, wind and hydropower <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99568-9.00016-9>

MINISTERIO DE NEGOCIOS, INNOVACIÓN Y EMPLEO (2023) Enabling investment in offshore renewable energy (2022). Consultado el 30 de noviembre de 2023.

OECD (2022). “Colombia supera a Italia, Canadá y Reino Unido en energías renovables”. *La República*. <https://www.larepublica.co/globoeconomia/colombia-supera-a-italia-canada-reino-unido-y-estados-unidos-en-energias-renovables-3431833>

ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA et al (2019) Evaluación de necesidades de capacitación en materia de Educación y Formación para América Latina. Informe sobre energía eólica.

ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA - OLADE (2022). “Panorama energético de América Latina y el Caribe 2022”. 1º edición, Quito. Documento pdf. Tomado de <https://www.olade.org/>

PERIÓDICO DE LA ENERGÍA. Finlandia, Dinamarca y Suecia lideran la revolución verde en Europa. Disponible en:

https://elperiodicodelaenergia.com/finlandia-dinamarca-y-suecia-lideran-la-revolucion-verde-en-europa/#google_vignette

PORTAFOLIO. 23 de junio 2023. Tomado de

<https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/sector-electrico-en-colombia-asi-funciona-la-generacion-de-energia-en-el-pais-584285>

Polo, J.M., Rodríguez, J. y Sarmiento, A. (2008). “Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas”. Revista de Ingeniería (28): 99-105, citado por citado por Quintero & Quintero, op.cit, p. 126.

PND:

http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2294_2023_pr006.html#235

PORTAFOLIO. Exportaciones colombianas crecieron 38 % en 2022. Disponible en: <https://www.portafolio.co/internacional/crecen-exportaciones-en-colombia-38-en-el-2022-577745>

PORTAFOLIO. ¿Por qué no le cuadra el dato de producción minera al sector? Disponible en: <https://www.msn.com/es-co/noticias/other/por-qu%C3%A9-no-le-cuadra-el-dato-de-producci%C3%B3n-minera-al-sector/ar-AA18AwFF>

PORTAFOLIO

<https://www.portafolio.co/economia/colombia-con-gran-potencial-para-producir-hidrogeno-verde-y-azul-570716>

Quintero, J.R & Quintero, L.E., “Energía mareomotriz: potencial energético y medio ambiente”.

Gestión y Ambiente, vol. 18, núm. 2, diciembre, 2015, pp. 121-134, Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

PEN 2022-2050

<https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PEN.aspx>

PLAN REPOWEREU- Plan para reducir rápidamente la dependencia con respecto a los combustibles fósiles rusos y avanzar con rapidez en la transición ecológica.

Ramírez, M., Montes de Oca, G., & Snyder, V. (2023, Marzo 21). *El impacto social de las mujeres de Nayarit en el proyecto más relevante de usos directos de la geotermia de América Latina y el Caribe - Energía para el Futuro*. Blogs iadb. <https://blogs.iadb.org/energia/es/el-impacto-social-de-las-mujeres-de-nayarit-en-el-proyecto-mas-relevante-de-usos-directos-de-la-geotermia-de-america-latina-y-el-caribe/>

REN 21. *RENEWABLES 2023 GLOBAL STATUS REPORT*. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf p. 14

Rodríguez Ospina, G., Alfaro Valero, C., & González Idárraga, C. E. (2019). Geotermia en Colombia. sgc.gov.co. <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf>

Sanyal, S., Robertson-Tait, A., Jayawardena, M., Hutterer, G., & Berman, L. (2016, Marzo). Análisis comparativo de estrategias para la mitigación del riesgo asociado a los recursos geotérmicos.

STATISTA, “Carbon capture and storage worldwide” Tomado de <https://www-statista-com.basesbiblioteca.uexternado.edu.co/topics/4101/carbon-capture-and-storage/#topicOverview>

World Bank Document. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/407911467995618028/pdf/105172-SPANISH-PUBLIC-FINAL-ESMAP-GeoRiskMitigation-KS024-16SP-web.pdf>

SEMANA. El 2023 seguirá siendo un año de ganancias para los gigantes petroleros, estas son las perspectivas. Disponible en: <https://www.semana.com/economia/empresas/articulo/el-2023-seguira-siendo-un-ano-de-ganancias-para-los-gigantes-petroleros-estas-son-las-perspectivas/202329/>

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. (2022, Abril 22). Visita del Banco Interamericano de Desarrollo al SGC y su apoyo al desarrollo de la geotermia en el país. sgc.gov.co. <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Visita-del-Banco-Interamericano-de-Desarrollo-al-SGC.aspx>

SER COLOMBIA (2023) Proyectos de energías renovables 2023-2024.
<https://ser-colombia.org/estudios-y-documentos/>

Sierra Vargas, F.A., Sierra Alarcón, A.F. y Guerrero Fajardo, C.A. (2011)
“Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica”
en SENA, Revista “Informador Técnico”, Bogotá, tomado de
[https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/22/3439#content/figure_ refer
ence_4](https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/22/3439#content/figure_reference_4)

Toro Jiménez, J.A. (2020). *Revisión de pequeñas centrales hidroeléctricas para
electrificar zonas no interconectadas de Colombia*. (Tesis de Maestría, Universidad
Nacional, Sede Medellín). Recuperado de
[https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/82846/1039453386.2022.pdf?sequ
ence=2&isAllowed=y](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/82846/1039453386.2022.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Torres, R., & Arancibia, L. (2021, Mayo). Estrategias para el Desarrollo de la
Energía Geotérmica. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
[https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32113/1/Estrategias_
para_el_Desarrollo_de_la_Energia_Geotermica.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32113/1/Estrategias_para_el_Desarrollo_de_la_Energia_Geotermica.pdf)

UNASUR. (n.d.). PROYECTO GEOTÉRMICO BINACIONAL TUFÍÑO –
CHILES – CERRO NEGRO.
http://www.cosiplan.org/proyectos/detalle_proyecto.aspx?h=1438

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS (2020) Grupo
de Investigación Xué, Semillero de Investigación Barión. “Pequeñas Centrales
Hidroeléctricas (Pch’s)”, Región Central. Bogotá, tomado de
[https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/Pequen%CC%83as-
Centrales-Hidroele%CC%81ctricas.pdf](https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/Pequen%CC%83as-Centrales-Hidroele%CC%81ctricas.pdf)

UPME: *Modificación resolución*
[https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/Proy
ecto_resolucion_modifica%20R464-2021_Tarifa_incentivos_Cir_072_2023.pdf](https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/Proyecto_resolucion_modifica%20R464-2021_Tarifa_incentivos_Cir_072_2023.pdf)

UPME. *Plan energético nacional 2020- 2050*
[https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/P
lan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf)

UPME Contrato C-031-2019- Realizar un estudio que permita formular un programa actualizado de sustitución progresiva de leña como energético en el sector residencial en Colombia, con los componentes necesarios para su ejecución .

https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/Plan_sustitucion_progresiva_Lena.pdf