

TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN COLOMBIA: PROPUESTAS PARA
PROMOVERLA A PARTIR DEL POTENCIAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES
Y SU NIVEL DE IMPLEMENTACIÓN ACTUAL EN EL PAÍS

Línea de Investigación:
ENERGÍAS RENOVABLES

Modalidad
TRABAJO DE GRADO

ABRAHAM ARMANDO MÉNDEZ BERNAL

Directora: Zully Gómez Rosales, Msc Ingeniería
Codirector: Paul Medina Chadid, Msc. y MBA

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS LIMPIAS
BOGOTÁ
2023

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1.OBJETIVOS	12
1.1 OBJETIVOS GENERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	12
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. ANTECEDENTES	13
4. MARCO TEÓRICO	18
5. METODOLOGÍA	20
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	21
6.1 Valoración de Energías Renovables	22
6.1.1 Energía Eólica	22
6.1.2 Energía Solar Fotovoltaica	23
6.1.3 Energía Geotérmica	24
6.1.4 Energía Marina	24
6.1.5 Energía Hidráulica	25
6.1.6 Energía de la Biomasa	25
6.1.7 Electrificación de la demanda de energía	27
6.1.8 Proyectos vigentes para generar energía eléctrica con ER	28
6.2 Acciones para apoyar el progreso de la Transición Energética	33
6.2.1 Integración de las energías renovables en la matriz energética nacional	34
6.2.2 Energías renovables y ZNI	38
6.2.3 Potencial del Hidrógeno Verde	38
6.2.4 Análisis de los resultados con base en indicadores y proyecciones de la demanda	43

6.3 Panorama de las termoeléctricas en Colombia	46
6.3.1 Termoeléctricas a carbón	46
6.3.2 Termoeléctricas a gas natural	50
7. IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO DEL PROYECTO	57
8. RECOMENDACIONES	58
9. CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS	64
ANEXOS	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Metodología	21
Tabla 2. Potencial Eólico	23
Tabla 3. Irradiación Solar Promedio	23
Tabla 4. Potencial energético de la biomasa residual	26
Tabla 5. Índice de cobertura de la energía eléctrica	28
Tabla 6. Número de proyectos de energías renovables por recurso	29
Tabla 7. Potencia de proyectos de energías renovables	29
Tabla 8. Proyectos de energía por departamento	30
Tabla 9. Estado de avance de proyectos de acuerdo con el tipo de energía renovable	31
Tabla 10. Potencia de proyectos por departamento	31
Tabla 11. Matriz colombiana de generación de energía eléctrica – 2019	33
Tabla 12. Capacidad instalada en FNCER Vs Diésel en las ZNI	38
Tabla 13. Clasificación del Hidrógeno como fuente de energía	39
Tabla 14. Pilares de la hoja de ruta del Hidrógeno en Colombia	40
Tabla 15. Índice de transición energética de Colombia al año 2023	44
Tabla 16. Termoeléctricas a carbón en la región central de Colombia	47
Tabla 17. Termoeléctricas a carbón en la región norte de Colombia	48
Tabla 18. Termoeléctricas a carbón en Santander del Norte	48
Tabla 19. Escenarios de salida de servicio de las termoeléctricas a carbón	56
Tabla 20. Dimensión financiera	59
Tabla 21. Dimensión grupos de interés	60
Tabla 22. Dimensión Procesos Internos	61
Tabla 23. Dimensión Aprendizaje y Crecimiento	62

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Índice de transición energética (ETI)	15
Figura 2. Rendimiento del sistema	15
Figura 3. Preparación para la transición	16
Figura 4. Cambio de temperatura media global en la superficie	17
Figura 5. Emisiones globales anuales de CO ₂	17
Figura 6. Potencia de proyectos por municipio	32
Figura 7. Generación eléctrica en las ZNI	37
Figura 8. Proyectos piloto de Hidrógeno en operación en Colombia	41
Figura 9. Capacidad de generación de energía eléctrica actual y con aportes de generación renovable proyectada a 2032	45
Figura 10. Capacidad de generación de energía eléctrica a 2050	45
Figura 11. Participación del carbón en la generación de energía eléctrica en Colombia	49
Figura 12. Emisiones de CO ₂ por el consumo de carbón para la generación de electricidad	50
Figura 13. Parque termoeléctrico de respaldo	51
Figura 14. Promedio de edad de la capacidad instalada del parque termoeléctrico	53
Figura 15. Capacidad instalada en carbón: histórica y proyecciones de eliminación gradual	54
Figura 16. Parámetros para la salida de las plantas termoeléctricas a carbón	55

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Ubicación proyectos de generación solar fotovoltaica	71
Anexo 2. Ubicación proyectos de generación eólica	71
Anexo 3. Localización de las ZNI	73
Anexo 4. Indicadores clave de desempeño para lograr el Escenario 1,5°C para 2030	74
Anexo 5. El panorama de innovación de IRENA para la integración de energías renovables variables	75

LISTA DE ABREVIATURAS

ANLA	Agencia Nacional de Licencias Ambientales
CCS / CCUS	Captura y secuestro de carbono / Captura, secuestro y uso de carbono.
CREG	Comisión de regulación de energía y gas
ER	Energías Renovables
FAER	Fondo para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas
FAZNI	Fondo para la Energización de las Zonas No Interconectadas
FENOGE	Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía
FNCER	Fuentes no convencionales de energía renovable
GEI	Gases de efecto invernadero
IEA	Agencia Internacional de Energía
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
IPSE	Instituto para la planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas
IRENA	Agencia Internacional de Energía Renovable
KW	Kilovatio
KWh	Kilovatio hora
MME	Ministerio de minas y energía
MW	Megavatio
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
PCH	Pequeña central hidroeléctrica
SIN	Sistema interconectado nacional
SSPD	Super intendencia de servicios públicos domiciliarios
STN	Sistema de Transmisión Nacional
TE	Transición Energética
UPME	Unidad de planeación minero-energética
ZNI	Zonas no interconectadas

RESUMEN

En diciembre de 2015, a raíz de la COP21 de París, se firmó un acuerdo internacional que establecía el objetivo de mantener, antes de finales de este siglo, el calentamiento global por debajo de 2 °C respecto a los niveles preindustriales, y de ser posible limitarlo a 1,5 °C. La COP26 de Glasgow, que tuvo lugar en noviembre de 2021, ratificó el compromiso de lograr la llamada Carbon Neutrality para 2050 (Acosta, 2022). Para alcanzar este objetivo, la herramienta principal es la transición energética, esto es, cambiar de un sistema energético basado en los combustibles fósiles a uno de bajas emisiones de carbono, basado en las fuentes de energía renovables (Enel Green Power, 2022).

El desarrollo de las energías renovables busca un mejoramiento en el nivel de bienestar de la población, ya que se fundamenta en la utilización de energías que mitigan la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI), lo cual impacta directamente en la moderación del cambio climático. Adicionalmente, un amplio portafolio de energías renovables permite diversificar la matriz energética de un país, con el consecuente aumento de la seguridad energética del mismo. En este trabajo se analizó el potencial de las energías renovables con las que cuenta el país, y a partir de dicho análisis se realizó una serie de propuestas conducentes a determinar cuál (es) son las energías renovables más adecuadas para explorar y explotar en una región determinada del país. El análisis mencionado se basa en las características particulares de cada región de Colombia, tales como ubicación geográfica, datos meteorológicos, número de pobladores, demanda energética, oferta energética, y si existe o no conexión con el Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Se hizo un énfasis especial en mostrar que la matriz energética del país es una de las más limpias del mundo, debido al alto componente hidráulico de la misma: La energía obtenida a través del recurso hidráulico se considera renovable. (IEA, 2022), hecho este que pone de manifiesto que la transición energética en Colombia no se realiza tanto por motivos de índole medioambiental (una matriz de energía tan limpia como la colombiana, permite cumplir fácilmente con los compromisos ambientales adquiridos en el ámbito internacional), si no por motivos eminentemente socioeconómicos. La transición energética permite el acceso de toda la población a servicios energéticos de calidad y le brinda al país una mayor seguridad energética, puesto que en caso de sequías prolongadas, lo que implica la disminución de la generación hidráulica, se contaría con un sólido respaldo por parte de las energías renovables. Se utiliza una metodología basada en la investigación bibliográfica y el análisis correspondiente de la información obtenida.

Palabras clave: Cambio climático, Combustibles fósiles, Eficiencia energética, Energías renovables, Transición energética

ABSTRACT

In December 2015, following COP21 in Paris, an international agreement was signed that established the goal of keeping global warming below 2 degrees Celsius compared to pre-industrial levels before the end of this century, and if possible, limit it to 1.5 degrees. The Glasgow COP26, which took place in November 2021, ratified the commitment to achieve the so-called Carbon Neutrality by 2050 (Acosta, 2022). To achieve this goal, the main tool is the energy transition, that is, switching from an energy system based on fossil fuels to one with low carbon emissions, based on renewable energy sources (Enel Green Power, 2022).

The development of renewable energies seeks an improvement in the level of well-being of the population, since it is based on the use of energies that mitigate GHG emissions, which directly impacts the moderation of climate change. Additionally, a broad portfolio of renewable energies allows the diversification of a country's energy matrix, with the consequent increase in its energy security. This paper analyzed the potential of renewable energies that the country has, and based on said analysis, a series of proposals are made leading to determining which are the most appropriate renewable energies to explore and exploit in a given region from the country. The aforementioned analysis is based on the particular characteristics of each region of Colombia, such as geographic location, meteorological data, number of inhabitants, energy demand, energy supply, whether or not there is a connection with the National Interconnected System (SIN), etc.

Special emphasis is placed on showing that the country's energy matrix is one of the cleanest in the world, due to its high hydraulic component: The energy obtained through hydraulic resources is considered renewable (IEA, 2022), a fact that shows that the energy transition in Colombia is not It is carried out both for reasons of an environmental nature (an energy matrix as clean as the Colombian one allows easy compliance with the environmental commitments acquired in the international arena), if not for eminently socioeconomic reasons. The energy transition allows the entire population access to quality energy services and give the country greater energy security, since in the event of prolonged droughts, which implies a decrease in hydraulic generation, there would be solid support from of renewable energies. A methodology based on bibliographic research and the corresponding analysis of the information obtained was used.

Keywords: Climate change, Energy efficiency, Energy transition, Fossil fuels, Renewable energies.

INTRODUCCIÓN

La transición energética plantea por lo menos los siguientes problemas: el reemplazo de las fuentes fósiles por renovables, el desarrollo de nuevas tecnologías como el almacenamiento y el hidrógeno, la electrificación de algunos sectores de la economía y la digitalización de las redes (Enel Green Power, 2022).

El desarrollo de energías renovables representa la clave de la transición energética. En los últimos años la energía fotovoltaica y la eólica se han sumado a otras tecnologías ya consolidadas, como la hidroeléctrica y la geotérmica, y hoy son las grandes protagonistas de la transición en curso. Un verdadero cambio de modelo centrado en la descarbonización, es decir, el abandono paulatino de las fuentes fósiles y, consecuentemente, en el cierre de las centrales alimentadas por carbón (Enel Green Power, 2022). La herramienta del cambio es la electrificación, esto es, la sustitución progresiva de las tecnologías que utilizan combustibles fósiles por tecnologías que usan electricidad que proviene solamente de fuentes renovables en todos los sectores, desde la cocina de nuestro hogar hasta la calefacción y el transporte (Corredor, 2018). De esta manera, se reducirá también la contaminación atmosférica en las ciudades. Y gracias a la digitalización de las redes, la eficiencia energética mejorará significativamente.

El país está trabajando por masificar las nuevas energías para lo cual se hace necesario evaluar el potencial de energías renovables de cada región del país, con el fin determinar cuál es la más apropiada, según criterios técnicos, socioeconómicos y medioambientales. También se están implementando iniciativas para la producción de hidrógeno verde, el cual es de gran importancia para resolver el problema de la contaminación que genera el transporte de carga pesada. (ENEL X Colombia, 2022).

No obstante lo expuesto con anterioridad, sobre el país se vislumbran algunos inconvenientes que podrían entorpecer la implementación exitosa de la transición energética. Si bien es importante contar con las comunidades para el desarrollo de la Hoja de Ruta de la transición energética, la mecánica propia de los diálogos sociales, la cual contempla lograr consensos, definir prioridades, acordar programaciones, asignar presupuestos, conocimiento del marco jurídico pertinente, además de seguimiento permanente, esto implica bastante tiempo e incertidumbre por las condiciones actuales de orden público en el país. Resulta entonces de la mayor importancia acelerar este proceso, teniendo en cuenta el conocimiento de los expertos nacionales en el tema, y la experiencia de otros países en el asunto.

Es en este contexto en el que se tendrá que seguir avanzando por parte de la actual administración nacional en la hoja de ruta de la Transición energética en el país, que tiene sus propias peculiaridades. Es de importancia resaltar que mientras en los EE. UU. y en la UE el 73.2% de sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provienen del sector energético, en Colombia este valor contribuye a ellas con el 30%. Adicionalmente, al tiempo que en el resto del mundo el sector eléctrico genera el 35% de dichas emisiones, en Colombia ronda el 5%. En Colombia, a

diferencia de los demás países, la principal fuente de emisiones de GEI, con el 45%, es el cambio de uso del suelo, la agricultura, la ganadería y sobre todo la deforestación, que el año pasado registró la alarmante cifra de 174.103 hectáreas, creciendo el área devastada por segundo año consecutivo (Acosta, 2022).

Con respecto a las emisiones de GEI asociadas a la operación de las centrales termoeléctricas en Colombia, lo mismo que a la quema de combustibles fósiles en el proceso de producción del petróleo y el gas natural, se sabe que éstas alcanzan el valor del 10% del total de emisiones a nivel nacional. Se trata de un valor que no se puede desconocer, ya que es bastante significativo, sobre todo en las regiones donde existen centrales termoeléctricas, o en zonas petroleras (IDEAM, 2016). Se observa entonces que el impacto de la generación termoeléctrica se debe considerar, y que la Transición Energética obliga en el mediano plazo a ir reemplazando gradualmente las plantas termoeléctricas, por centrales que funcionen a base de fuentes de energía renovables. Por su parte, la naturaleza opera a favor del medioambiente, realizando una importante labor de captura y almacenamiento de CO₂. A nivel mundial los bosques, sobre todo los bosques tropicales, absorben entre el 25 % y el 30 % del CO₂ que se emite a la atmósfera, en tanto que los océanos absorben aproximadamente un tercio de tales emisiones (National Geographic, 2019). Es una contribución importante de la naturaleza, pero no es suficiente. Las diferentes instituciones y los individuos deben esforzarse más en reducir la huella de carbono.

La Transición energética es un proceso lento y que requiere de la participación de los principales estamentos del país (Academia, Industria, Comunicaciones, Gremios, Agricultura, Transporte, etc.). Debido a la preeminencia prácticamente renovable de nuestra matriz energética (a causa del componente hidráulico) y a las consecuentes bajas emisiones de GEI, además de la fragilidad de nuestra economía (dependiente del petróleo y el carbón), es necesario seguir ofertando contratos de exploración petrolera y gasífera. La transición energética no debe lesionar la seguridad y la soberanía energética del país.

Colombia, debido a su exuberante y variada geografía, cuenta con un excelente potencial de energías renovables, las cuales se pueden aprovechar para consolidar la Transición Energética, asegurar una matriz de energía más diversa y por tanto más robusta, y lograr soberanía energética estable y sostenible. En Colombia hay condiciones excepcionales para las energías fotovoltaica, eólica, geotérmica, de la biomasa y mareomotriz.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Proponer las energías renovables más adecuadas para promover la transición energética en Colombia, a través del análisis teórico del nivel de implementación actual de la misma en el país.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Realizar una valoración de las energías renovables disponibles en Colombia, bajo criterios técnicos, medioambientales y socioeconómicos.
2. Proponer acciones a implementar con el fin de apoyar el progreso de la transición energética en Colombia, basadas en las energías renovables de mayor potencial en el país.
3. Analizar el panorama actual de la energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles en Colombia, con el fin de cuantificar dicha energía y proponer acciones para ir disminuyendo paulatinamente su aporte a la matriz energética del país, en favor de la incorporación de energías renovables.

2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia se tiene una de las matrices de generación de energía eléctrica más limpias del mundo; las emisiones de GEI de Colombia corresponden al 0.4% mundial (IDEAM, 2016), lo que indica un bajo aporte de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que las razones que motivan la transición energética son esencialmente de carácter social y económico y no medioambiental (Escallón., et al, 2021). Por tal razón, en este trabajo se analiza el potencial existente de las diversas energías renovables con que cuenta el país, para determinar cuál o cuáles son las energías renovables más adecuadas para cada región del país; las más indicadas para generar bienestar en las diferentes poblaciones, teniendo presente que el impacto ambiental asociado, si bien no es muy significativo, tampoco es despreciable dependiendo de la zona geográfica del país. En Colombia es posible hacer uso de la mayoría de las energías renovables conocidas, dependiendo de las características geográficas y meteorológicas de cada región.

De acuerdo con ACOLGEN (2021), en Colombia la participación de las plantas termoeléctricas es del 33%, con 17.800 MW. De esta cantidad, 1.665 MW corresponden a la energía eléctrica generada a partir del carbón (9,35%). En Colombia, la cantidad de CO₂ generada para producir 1KWh es 164,38 gramos. Este valor permite determinar la huella de carbono del país, y deberá reducirse de dos maneras, una disminuyendo la producción de las centrales termoeléctricas y la

otra, aplicando la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂, en la medida en que los costos asociados y la disponibilidad de la mencionada tecnología lo permitan.

De otra parte, el aporte que hacen las energías renovables a la diversificación de la matriz energética del país es de gran relevancia, ya que no sólo propenden por una mayor seguridad energética, sino que además contribuyen a la descarbonización progresiva de la economía. También es importante destacar que una matriz energética más diversa (con mayor componente de energías renovables), facilita la ampliación de los servicios energéticos, con lo cual se le daría acceso a energía eléctrica a poblaciones que actualmente no están interconectadas a la red eléctrica nacional (Corredor, 2018).

Adicionalmente, en este trabajo se hace énfasis en la importancia que tiene para el país dar cumplimiento a las metas trazadas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de París. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son unas metas acordadas y adoptadas en el 2015 por los países miembros de las Naciones Unidas, que buscan garantizar la implementación de medidas globales que impulsen el crecimiento y desarrollo global equilibrando de forma sostenible los ámbitos económico, social y ambiental. Son varios los Objetivos de Desarrollo Sostenible que ratifican el proceso de transición energética que está atravesando actualmente el mundo, entre los que se destacan el ODS 7: Energía asequible y no contaminante, y el ODS 13: Acción por el clima (De la Rosa, 2020).

Con respecto al Acuerdo de París, para dar cumplimiento a los objetivos de este se hace imprescindible la reducción progresiva del uso de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural, para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y limitar el aumento de la temperatura global atmosférica. El Acuerdo de París es un tratado firmado por 197 países que tiene como objetivos principales reducir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, limitar para este siglo el aumento de la temperatura global (que no supere los 2 grados centígrados con respecto a los niveles previos a la revolución industrial), alcanzar la neutralidad climática en 2050, es decir, que la cantidad de CO₂ -dióxido de carbono- liberado a la atmósfera por las actividades humanas, sean iguales a las cantidades que absorben los sumideros naturales de CO₂ como los océanos y bosques (Becerra, 2022).

3. ANTECEDENTES

De acuerdo con información de la Agencia Internacional de la Energía, las emisiones de CO₂ han ido creciendo muy rápidamente en los países en desarrollo, mientras que en Estados Unidos y Europa se observa una ligera tendencia a la baja (International Energy Agency, 2021). En este contexto, la transición energética es algo necesario para que los países crezcan impactando en la menor medida posible el medio ambiente (Barbosa., Hamzagic, 2022). Al revisar la literatura especializada

sobre el tema se encuentra que existe una tendencia en el crecimiento de la demanda de: petróleo, gas natural, energías renovables y energía nuclear, mientras que se observa una caída en la demanda del uso tradicional de biomasa y carbón (IEA, 2022). También se verifica que, a pesar del llamado a la reducción a cero del uso de los combustibles fósiles, esta realidad aún no es posible, por la falta de recursos suficientes para entregar la energía proveniente de fuentes renovables, requerida para el crecimiento del consumo. De acuerdo con las fuentes consultadas, las estrategias mayormente recomendadas para afrontar exitosamente una transición energética son: Eficiencia energética, Energías renovables y Captura y secuestro de carbono (Babarinde., Adio, 2022).

La energía solar, junto a la eólica, son las grandes protagonistas de la transición energética actual. La energía solar fotovoltaica, marginal hasta hace pocas décadas, conoce hoy un crecimiento vertiginoso: ésta ha aumentado de 40 GW en 2010 a 580 GW en 2019 (Enel Green Power, 2022). El mérito es básicamente de la innovación tecnológica, principalmente del sector de la ciencia de los materiales, que hizo competitivas las plantas fotovoltaicas incluso desde el punto de vista económico respecto a las fuentes fósiles: de acuerdo con IRENA (Agencia Internacional de la Energía Renovable - International Renewable Energy Agency), los costes de la producción de electricidad fotovoltaica han bajado un 82% en la última década. Y las perspectivas son aún más alentadoras: con las tecnologías de nueva generación se podrá aumentar la eficiencia de los paneles solares en un 30% con respecto a hoy y la productividad en más de un 20% (BBVA, 2023).

También en el sector de la energía eólica la tecnología ha mostrado grandes avances: en la actualidad, las palas eólicas llegan a un diámetro de 200 metros y se prevé que sus dimensiones crezcan aún más. También en este caso la mayor productividad disminuyó los costes: entre 2010 y 2019 bajaron respectivamente un 39% para la energía eólica onshore y un 29% para la offshore. El resultado es un crecimiento impresionante: la capacidad total de los parques eólicos onshore subió de 178 GW en 2010 a 594 GW en 2019. Las plantas offshore tuvieron un desarrollo más lento, con solo 28 GW instalados en 2019, pero con un margen de crecimiento enorme (Becerra, 2022).

El denominado **ETI** (Energy Transition Index – Índice de Transición Energética), ubica a Colombia en el puesto 39 (entre 120 países) en la implementación de la Transición Energética a nivel mundial para el año 2023. El índice de la Transición Energética consta de dos variables, el **PS** (Performance System – Rendimiento del Sistema) y la **TR** (Transition Readiness - Preparación para la Transición Energética). Con el propósito de conocer la tendencia del ETI de Colombia en el período de tiempo 2017-2023, se presentan a continuación las Figuras 1., 2. y 3.

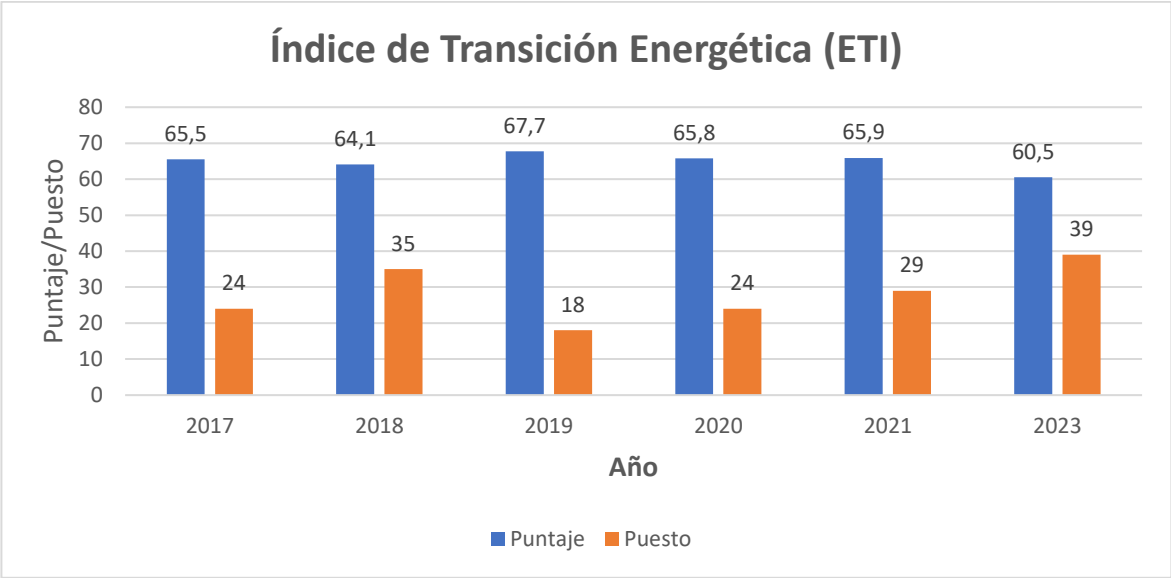


Figura 1. *Elaboración propia a partir de datos del (World Economic Forum., 2023)*

Como puede observarse en la Figura 1., el puntaje del ETI ha bajado 7,2 unidades en el período 2019 - 2023, en tanto que el país ha descendido 21 lugares en el ranking con respecto al 2019, año en el cual Colombia ocupó el mejor puesto (18) y mostraba su mejor puntaje (67,7).

Con respecto a las dimensiones que componen el ETI, el comportamiento de éstas en el mismo período de tiempo se ilustra a continuación en las Figuras 2 y 3.

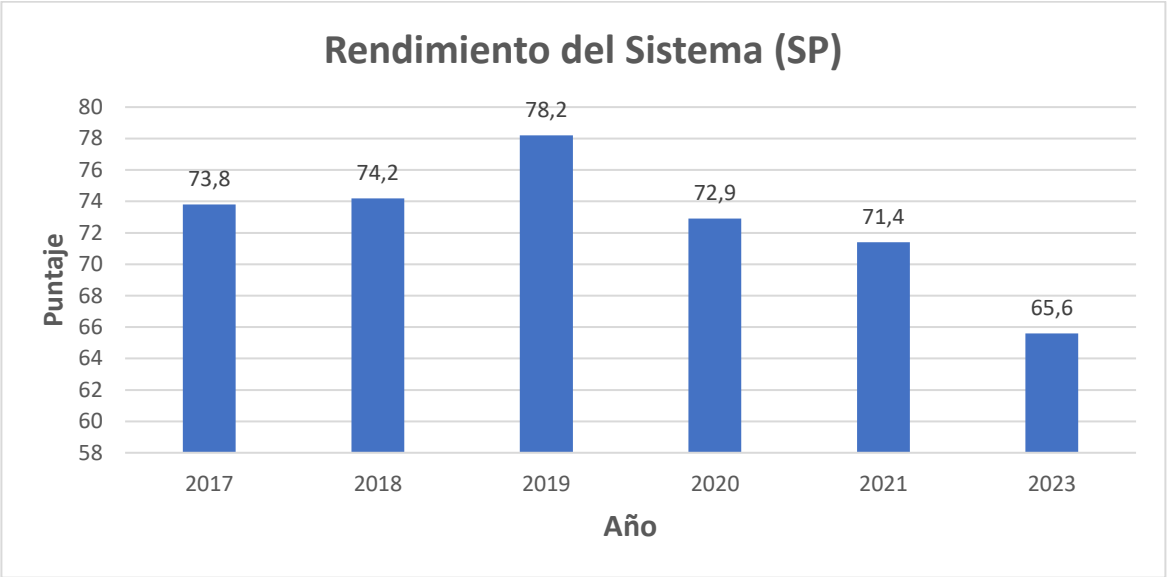


Figura 2. *Elaboración propia a partir de datos del (World Economic Forum., 2023)*

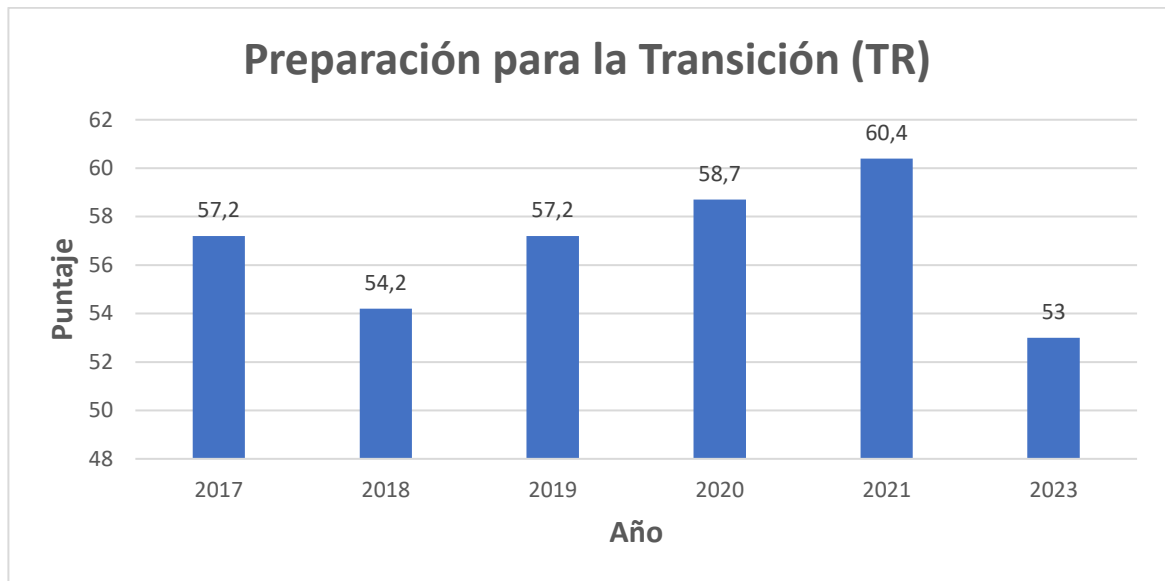


Figura 3. Elaboración propia a partir de datos del (World Economic Forum., 2023)

Del análisis de la variable *Rendimiento del Sistema* se observa que hay una tendencia a la baja en el puntaje. Esta tendencia indica falencias en la infraestructura del sistema energético de Colombia. De otra parte, la variable *Preparación para la Transición Energética* muestra una tendencia al incremento del puntaje hasta el año 2021. En el año 2023 el puntaje se reduce drásticamente, 7,4 puntos con respecto al año 2021. Este comportamiento de la variable *Preparación para la Transición Energética* indica insuficiencia de fuentes de financiación y un bajo grado de Innovación.

En lo referente al aumento de la temperatura y de las emisiones de CO₂ que afectan al planeta, se puede inferir con base en el análisis de las Figuras 4. y 5., que a pesar de los acuerdos internacionales y a los llamados continuos de los expertos del IPCC y de otras entidades científicas prestigiosas, en el sentido de aunar esfuerzos para mitigar el calentamiento global, la humanidad en conjunto no está haciendo lo suficiente para descarbonizar la economía. La temperatura global sigue en aumento, y las emisiones de GEI continúan al alza. Las grandes potencias, justamente las que más contaminan, son las que persisten en el uso intensivo de los combustibles fósiles.

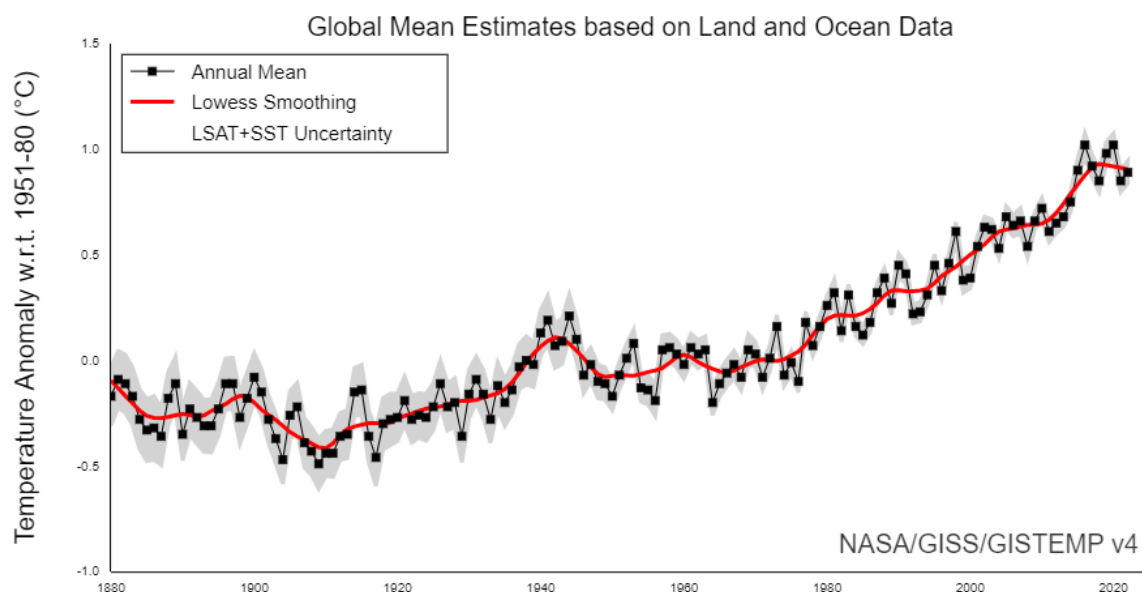


Figura 4. Tomada de NASA GISS DATA (V4). (2020).

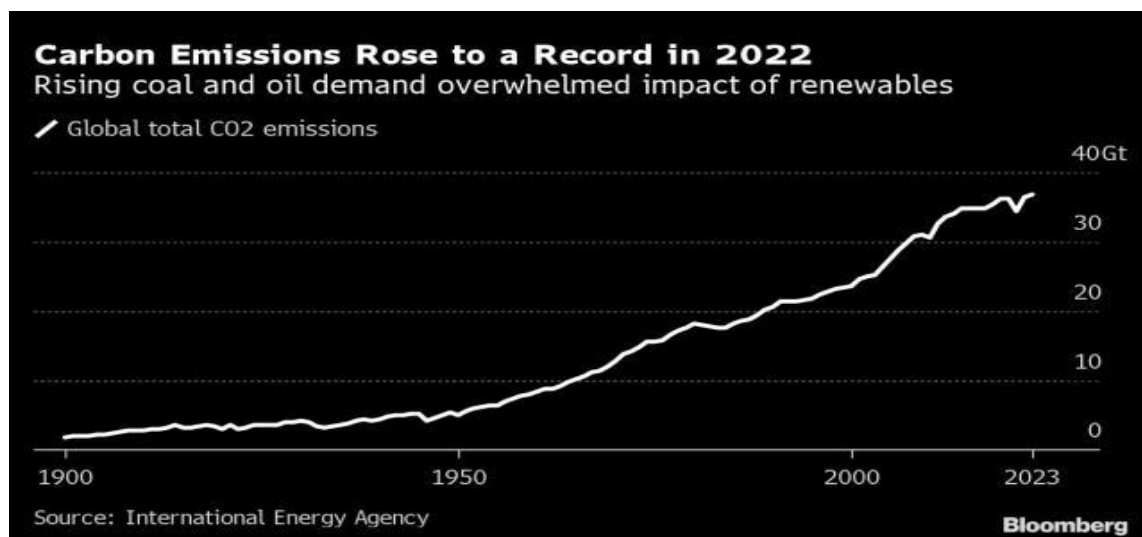


Figura 5. Tomada de Yahoo Finanzas, 2023

Colombia actualmente está llevando a cabo acciones hacia la transición energética, teniendo en cuenta lo reportado por el Ministerio de Minas y Energía en informe de 22 de octubre de 2020, debido a la subasta de renovables realizada en el 2019, logró la asignación de 2,250 megavatios que provengan de fuentes renovables (Dinero, 2019). Esto permite “dar un salto histórico hacia la Transición Energética, y asegurar la construcción de 14 proyectos eólicos y solares que permitirán que

estas tecnologías representen el 12% de la matriz eléctrica en el año 2022.” (Ministerio de Minas y Energía, 2020) (De la Rosa, 2020).

Adicionalmente, se están desarrollando estrategias para la movilidad sostenible a través de energéticos de cero y bajas emisiones, como fue establecido de forma conjunta mediante el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible a través de la Resolución 4017 de 2020, en virtud de la cual se definieron los energéticos de bajas o cero emisiones, tomando como criterio fundamental los componentes nocivos para la salud y el medio ambiente.

El consumo energético colombiano con respecto al consumo mundial alcanza solo el 0,28% (IEA, 2022), lo cual indica que el país no es un gran aportante a las emisiones totales, y por tanto no es un responsable en mayor medida de este fenómeno. Sin embargo, esto no significa que no se debe analizar la situación nacional y contribuir, en lo que corresponda, a mejorar las condiciones locales así su efecto a nivel global no sea mayor. Es la única forma de lograr las metas mundiales. La matriz energética en Colombia es diferente a la de la mayoría de los países debido a la preponderancia de la generación hidroeléctrica. No obstante, y a pesar de que esto es cierto en la generación eléctrica, el nivel de consumo total de energía del país es altamente dependiente de las fuentes convencionales (petróleo y gas fundamentalmente). (Corredor, G. 2018).

La transición energética es imperativa, ya se está llevando a cabo prácticamente en todos los países del planeta. Debe ser un proceso claramente estructurado y orientado por políticas públicas de amplio conocimiento general. La Ley 2099 de 2021 es un avance en este sentido ya que, entre otras iniciativas, ofrece amplios medios de financiación para la promoción de las energías renovables. La UPME por su parte también apoya el proceso de la transición energética aportando información clave como el Plan Energético Nacional y la Matriz Energética del país.

4. MARCO TEÓRICO

La transición energética y el cambio climático están directamente relacionadas, pues el objetivo de este proceso es reemplazar gradualmente las energías no renovables, es decir, las que se generan a partir de combustibles fósiles, por energías renovables, obtenidas de fuentes inagotables, como la eólica y la solar (BBVA, 2023).

En Colombia, la transición energética y el cambio climático son prioridad tanto para entes públicos como privados, debido al compromiso adquirido por el Estado Colombiano para lograr la neutralidad del carbono en 2050. Durante los últimos años los avances han sido positivos. En 2021 el Congreso de la República expidió la Ley 2099 o ley de transición energética con la cual se promueve el uso de fuentes no convencionales de energía y se dictan otras disposiciones al respecto (ENEL X Colombia, 2022)

Asimismo, el Ministerio de Minas y Energía señala que actualmente el país tiene una capacidad energética de 1.365 MW, generados por centrales solares y eólicas. Además, con los proyectos que se encuentran en construcción y los que faltan por desarrollar, en los próximos años se contará con más de 4.500 MW producidos con fuentes renovables (UPME, 2021).

Recientemente el Gobierno Nacional aprobó el CONPES 4075 (DNP, 2022), donde se define la política de transición energética bajo cuatro pilares:

Seguridad y confiabilidad en el abastecimiento energético.

Conocimiento e innovación en transición energética.

Desarrollo y crecimiento económico a partir de las oportunidades que ofrece la transición energética.

Desarrollo de un sistema energético que contribuya a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

La lucha contra la pobreza energética de muchas zonas del planeta y las inversiones para garantizar el acceso a la energía limpia a todos, también representan una gran oportunidad de desarrollo para las comunidades locales. Lo importante es que la transición energética sea inclusiva y no deje a nadie atrás. En definitiva, una transición que sea justa (Banco Mundial, 2022).

Algunas de las estrategias más importantes para implementar la transición energética, son la digitalización de las redes, el aumento de la eficiencia energética, y la innovación y desarrollo en la utilización de energías renovables (Enel Green Power, 2022). A largo plazo y no por ello menos importante está la educación a todo nivel sobre transiciones energéticas y desarrollo sostenible.

En Colombia se dispone prácticamente de todas las formas de energías renovables, hecho que se tiene en cuenta en la Ley 1715 de 2014 – Capítulo IV, en el cual se promulgan el desarrollo y promoción de las fuentes no convencionales de energías renovables. La energía eólica tiene un gran potencial en la costa caribe, principalmente en la Guajira, y en algunas zonas de Santander, Boyacá y Huila (Guerrero et al., 2019). Con respecto a la energía solar, los departamentos en los cuales hay mejores condiciones para su explotación son Antioquia, Meta, Cundinamarca, Magdalena, Tolima, Norte de Santander, Caldas, Atlántico y Córdoba (SOLMIC, 2022).

La energía Geotérmica pese a ser una fuente muy consolidada en otras partes del mundo (Indonesia, EE. UU., Turquía, Kenia, Etiopía, entre otros) en Colombia es prácticamente desconocida. Para el año de 2016 en la UPME solo se tiene registrado un proyecto geotérmico de 50MW por parte de ISAGEN (Marzolf, 2015). En la Ley 1715 de 2014 – Capítulo IV, se crea un Registro Geotérmico en el cual se deben inscribir todos los proyectos de exploración y explotación de la energía geotérmica.

Además de las energías eólica, solar y geotérmica, en Colombia también tienen potencial la energía proveniente de la biomasa, la energía de los mares y las pequeñas centrales hidroeléctricas (De la Rosa, 2020). Otra fuente de energía abundante, no contaminante y aprovechable en Colombia es el denominado Hidrógeno Verde. Como se sabe, el hidrógeno es el elemento de mayor presencia en el universo, y el que más energía convencional tiene por unidad de peso, pero no se encuentra como elemento en forma natural, es necesario obtenerlo a partir de otras sustancias como el agua (Escallón., et al, 2021). Este proceso de obtención es la electrólisis la cual consume bastante energía. Cuando la electrólisis se lleva a cabo utilizando energías renovables, se está hablando de Hidrógeno Verde. Este material así obtenido es una excelente opción para la industria pesada, el transporte aéreo, terrestre y marítimo, ya que además de sus propiedades energéticas posee grandes ventajas en cuanto almacenamiento y transporte.

5. METODOLOGÍA

Las actividades propuestas en la Tabla 1. constituyen la guía metodológica conducente al logro del objetivo principal del presente trabajo. La mencionada guía está alineada con los objetivos específicos de la investigación, lo cual favorece un enfoque más preciso de las tareas asociadas con la ejecución de este trabajo, y una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

METODOLOGÍA		
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	RESULTADOS
1. Realizar una valoración de las energías renovables disponibles en Colombia, bajo criterios técnicos, medioambientales y socioeconómicos	Para las diferentes regiones del país hacer una valoración de variables tales como proyectos de energías renovables ya aprobados, en curso o ya instalados, número de habitantes, estado de conexión a la red, presupuesto disponible, fuentes de energías renovables cercanas, etc.	Listado de las variables a partir de las cuales realizar la investigación
	Clasificación y depuración de la información ya obtenida	Matriz de las energías renovables disponibles en el país.
Proponer acciones a implementar con el fin de apoyar el progreso de la Transición Energética en Colombia, basadas en las energías renovables de mayor potencial de acuerdo con los resultados del ítem anterior	Análisis de las energías renovables y fuentes de energía no contaminantes, que presentan mayor potencial de ser exploradas y explotadas. Se incluye la ponderación del hidrógeno verde, el cual no se considera una fuente de energía renovable por no ser obtenido directamente de la naturaleza. Sin embargo, se cataloga como un vector energético y un combustible de gran contenido energético y prácticamente inagotable.	Listado de energías renovables y vectores energéticos con mayor potencial de implementación en el país, y una serie de recomendaciones para promover la transición energética en Colombia.
3. Analizar el panorama actual de la energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles en Colombia, con el fin de cuantificar dicha energía y proponer acciones para ir disminuyendo paulatinamente su aporte a la matriz energética del país, en favor de la incorporación de energías renovables	Realización de inventario de las plantas termoeléctricas existentes en el país, incluyendo potencia instalada, generación de KWh, y cantidad de emisiones de GEI a la atmósfera	Balance actual de la participación de las plantas termoeléctricas en Colombia, en cuanto a capacidad de generación y emisión de GEI. Se dispondrá también de una serie de recomendaciones para ir disminuyendo en forma gradual la cantidad de GEI que aportan las plantas termoeléctricas a la atmósfera, lo cual redundará en una menor contaminación del aire, y al cumplimiento de la neutralidad de carbono suscrita por el Estado Colombiano a 2050 ante la COP26.

Tabla 1.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las variables a considerar en el presente trabajo son: Energías Renovables disponibles en Colombia, proyectos de generación de energía eléctrica a partir de

energías renovables en Colombia, Electrificación de la Demanda de Energía y Generación Distribuida.

6.1 Realizar una valoración de las energías renovables disponibles en Colombia, bajo criterios técnicos, medioambientales y socioeconómicos.

Con respecto a la oferta de energía primaria, aproximadamente el 81% de la energía consumida a nivel mundial proviene de fuentes fósiles, mientras que el 19% restante proviene de fuentes renovables. En Colombia, aproximadamente el 78% de la energía que se consume proviene de fuentes fósiles (Petróleo, carbón mineral, y gas natural), y el 22% restante se obtiene a partir de fuentes renovables (Hidroenergía, biomasa y otros renovables). (UPME, 2015a). La tendencia nacional se puede modificar en beneficio del país, si se aprovecha en mayor medida el inmenso potencial de energías renovables con que cuenta Colombia. Este cambio en la forma de producir y consumir energía es posible, debido a que los costos asociados a la explotación de energías renovables continúan disminuyendo, y a que las tecnologías involucradas en tal proceso avanzan cada día más haciéndose más accesibles, confiables y seguras.

Con respecto a las energías renovables disponibles en Colombia, en este país se tienen prácticamente todas las conocidas a la fecha. Se cuenta con energía eólica, energía solar fotovoltaica, energía de la biomasa, energía geotérmica, energía hidráulica (proveniente de grandes y pequeñas centrales) y energía marina. También se dispone de un gran potencial para producir Hidrógeno Verde, el cual se considera un vector energético, ya que no se encuentra directamente en la naturaleza, por lo cual se requiere de diferentes procesos para obtenerlo.

6.1.1 ENERGÍA EÓLICA

El recurso eólico disponible en el país se ubica en regiones como el departamento de La Guajira y gran parte la región Caribe (ver Anexo 2), al igual que en parte de los departamentos de Santander y Norte de Santander, zonas específicas de Risaralda y Tolima, el Valle del Cauca, el Huila y Boyacá. El caso específico de La Guajira es considerado como uno de los mejores de Sur América. En este departamento se concentran los mayores regímenes de vientos alisios que recibe el país durante todo el año con velocidades promedio cercanas a los 9 m/s (a 80 m de altura), y dirección prevalente este-oeste los cuales se estiman, representan un potencial energético que se puede traducir en una capacidad instalable del orden de 18 GW, es decir, casi 1,2 veces la capacidad de generación instalada en el SIN a diciembre de 2014 (15.465 MW). En la Tabla 2. se indican las regiones del país con mayor potencial eólico y sus respectivos valores.

POTENCIAL EÓLICO	
REGIÓN DE COLOMBIA	POTENCIAL EÓLICO (MW de capacidad instalable)
La Guajira	18.000
Costa Norte*	20.000
Santanderes	5.000
Boyacá	1.000
Risaralda - Tolima	1.000
Huila	2.000
Valle del Cauca	500

Tabla 2. *Elaboración propia a partir de datos de (UPME, 2015_a)*

*Excluyendo a la Guajira

6.1.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTÁICA

En Colombia se cuenta con una irradiación solar promedio de 4,5 kWh/m² /d (UPME, IDEAM, 2015), la cual supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m² /d. Este hecho sumado a la ubicación geográfica del país (país ecuatorial) presenta la ventaja adicional de tener una buena radiación solar promedio a lo largo del año al no experimentar el fenómeno de las estaciones. En la Tabla 3. se presentan los valores promedio de irradiación solar para algunas regiones del país.

IRRADIACIÓN SOLAR PROMEDIO	
REGIÓN DE COLOMBIA	PROMEDIO IRRADIACIÓN (KWH/m ² /día)
Guajira	6,0
Costa Atlántica	5,0
Orinoquía	4,5
Amazonía	4,2
Región Andina	4,5
Costa Pacífica	3,5

Tabla 3. *Elaboración propia a partir de datos de (UPME, 2015_a)*

De acuerdo con el Atlas de radiación solar de la UPME, regiones particulares del país como son La Guajira, una buena parte de la Costa Atlántica y otras regiones específicas en los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta, entre otros, presentan niveles de radiación por encima del promedio nacional que pueden llegar al orden de los 6,0 kWh/m² /d. Por otro lado, regiones como la Costa Pacífica reciben niveles por debajo del promedio, los cuales sin embargo siguen siendo aprovechables para generar energía eléctrica a partir de paneles solares.

6.1.3 ENERGÍA GEOTÉRMICA

La energía geotérmica presenta muchas ventajas que la han posicionado como una energía atractiva para desarrollar. Entre sus mayores beneficios de uso, se destaca el empleo de una tecnología renovable que mitiga el impacto ambiental, al tener bajas emisiones de CO₂ en comparación con las plantas térmicas (se dice que típicamente producen de 5 a 10% de las emisiones de CO₂ de una planta térmica a carbón). Por otro lado, es una fuente de trabajo constante al no depender de ningún fenómeno climático, lo que la hace idónea para suplir la carga base de un sistema eléctrico y en conjunto con un factor de planta alto otorga confiabilidad al mismo sistema. Adicionalmente, se destaca una larga vida útil si se maneja adecuadamente el recurso en los yacimientos, de modo que la tasa de uso sea menor o igual a la de reabastecimiento. Finalmente, requiere un área reducida de terreno para su implementación frente a otros tipos de energía como la hidráulica, la solar, la biomasa, entre otras. (Velandia J., 2016)

Colombia, por su posición privilegiada en el cinturón volcánico de los Andes, tiene un potencial geotérmico elevado, el cual a pesar de sus ventajas no ha sido explotado en la actualidad. El país cuenta con zonas como la región volcánica del Nevado del Ruiz y la zona de influencia de los volcanes Chiles, Cerro Negro y Azufral en la frontera con Ecuador, zonas en las que el recurso puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica a muy bajos costos de producción y operación. El potencial para desarrollo de generación eléctrica a partir del recurso geotérmico en Colombia por ahora se estima en el orden de 1 a 2 GW. (UPME, 2015).

6.1.4 ENERGÍA MARINA

La energía marina incluye cuatro formas de energía, las cuales se pueden extraer de las mareas, las olas, las corrientes, los gradientes térmicos y los gradientes salinos de los océanos.

En relación con la energía de las mareas, la costa pacífica colombiana puede convertirse en el mayor potencial energético de Colombia, debido a que sus mareas superan los tres metros. Los estudios han establecido que el potencial energético es de 120 MW, de los cuales se resalta a bahía Málaga con 3,5 MW y la ensenada de Tribugá con 0,5 MW como las zonas con mayor potencial energético. Punta Catripe (8 MW), Bocana Bazán (6 MW) y boca Naya (13MW) son otros sitios que presentan un importante potencial energético. (ALLPE Ingeniería y medio ambiente S.L, 2019)

En cuanto a la energía de las olas, se podría aprovechar el oleaje del mar caribe, ya que sin ser olas de gran tamaño, la existencia en la región de puertos importantes, centros poblados e infraestructura de transmisión eléctrica, hacen de esta región una excelente ubicación para el desarrollo de este tipo de energía.

Con respecto al aprovechamiento de los gradientes salinos, el mar caribe presenta las mejores condiciones en Colombia. El desarrollo de proyectos en esta área exige conocimientos avanzados en membranas, electroquímica y nanotecnología, los cuales aún son muy incipientes en el país. (Osorio A., 2022)

6.1.5 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

Para efectos del interés de este trabajo, solo se analizarán las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs), ya que éstas presentan un alto potencial de ser utilizadas en las ZNI, presentan un impacto ambiental mínimo, y su costo es mucho menor que el de una central hidroeléctrica estándar. Las PCHs brindan la ventaja de no requerir altas caídas ni grandes caudales de agua, por lo cual no generan altos impactos en el medio ambiente, como sucede con otros métodos de generación o con las grandes centrales hidroeléctricas. Además, su versatilidad de instalación permite suministrar el servicio de energía a lugares de difícil acceso, ampliando el cubrimiento de la demanda energética (Pacheco y Torres, 2021).

A la fecha se tienen un total de 118 PCHs operativas en el SIN colombiano (Vergara., 2020). Adicionalmente a las 118 PCHs que se encuentran en el SIN, se tienen en el territorio colombiano 3 PCHs que actualmente se encuentran en Zonas no interconectadas, éstas son las ubicadas en los municipios de Mitú en Vaupés, Bahía solano y Cupica en el Choco. En Colombia, los proyectos de PCHs al ser FNCER (Fuente no convencional de energía renovable) cuentan con varios beneficios y extensiones tributarias en pago de IVA, deducciones en el impuesto de la renta, deducción para la importación y compra de equipos e insumos y depreciación acelerada en sus equipos. Al igual que existe el mecanismo de aplicar depreciación acelerada de todos los equipos usados, la maquinaria y las obras civiles de estos proyectos tal como lo establece la ley 1715 de 2014.

6.1.6 ENERGÍA DE LA BIOMASA

En Colombia la utilización de la energía de la biomasa se visualiza como una de las opciones para desarrollar proyectos de generación de energía sustentable en las ZNI. El potencial para el aprovechamiento de esta energía se encuentra en los residuos agrícolas y pecuarios principalmente, y en menor proporción en otros residuos resultantes de la poda y de los centros de acopio y plazas de mercado. También son significativos los residuos provenientes de las fuentes de metano tales como destilerías de etanol y plantas de sacrificio bovino, porcino y avícola.

La participación de la biomasa en la producción de energía primaria en Colombia es cercana al 15 %. Esta importante contribución se debe principalmente a la generación de biomasa residual en la agroindustria nacional. Dentro de estos sectores, los correspondientes a la caña de azúcar y la palma de aceite son relevantes porque generan materias primas para la producción de biocombustibles

(líquidos) como bioetanol y biodiesel y, simultáneamente, grandes cantidades de biomasa residual sólida, como el bagazo de caña y la fibra, el cuesco y el raquis de la palma de aceite. (Rincón S., 2021)

En la Tabla 4. se muestran los datos correspondientes a la cantidad de biomasa residual disponible, potencial energético técnico asociado y los lugares representativos en Colombia en donde se aprovecha este recurso.

POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL					
BIOMASA RESIDUAL	PRODUCTO PRINCIPAL	CANTIDAD DISPONIBLE (Ton/año)	POTENCIAL ENERGÉTICO O TÉCNICO (PJ/año)	DEPARTAMENTO REPRESENTATIVO	MUNICIPIO REPRESENTATIVO
Cogollo	Caña de azúcar	1.521.635,7	32,61	Valle del Cauca	Palmira
Polinaza	Avícola (engorde)	658.810,9	11,35	Santander	Piedecuesta
Cascarilla	Arroz	387.786,5	6,91	Tolima	Saldaña
Pinus Patula	Forestal	326.305,9	6,25	Región Orinoquía, eje cafetero y Suroccidental	
Acacia Mangium	Forestal	318.889,9	5,98	Región Caribe y alto Magdalena	
Raquis	Palma de aceite	251.187,7	4,65	Meta	San Carlos de Guaroa
Eucalyptus grandis	Forestal	192.665,9	3,68	Región Orinoquía, eje cafetero, Suroccidental, Caribe y alto Magdalena	
Gmelina arborea	Forestal	155.533,9	2,94	Región Caribe y alto Magdalena	
Cuesco	Palma de aceite	57.753,8	1,16	Meta	San Carlos de Guaroa
Pinus maximinum	Forestal	44.711,2	0,85	Región Orinoquía, eje cafetero y Suroccidental	
Cisco	Café	34.963,5	0,65	Huila	Pitalito
Fibra	Palma de aceite	15.034,9	0,27	Meta	San Carlos de Guaroa
Total Colombia		3.965.279,8	77,3	X	X

Tabla 4. Tomada de (Cáceres L., Guío D., Rincón S., 2016)

En el Anexo 5 se presenta, con alcance global, un esquema de IRENA, en el cual se aprecia un panorama de innovación cuyo fin es la integración de la energías renovables variables. Se tienen en cuenta los impactos de los modelos de negocio, la incorporación de nuevas tecnologías, el diseño de los mercados, y la operación del sistema en general.

6.1.7 ELECTRIFICACIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA

Uno de los objetivos de mayor impacto de la Transición Energética es promover la electrificación de la demanda de energía. El acceso a la energía eléctrica mejora las condiciones de vida de las personas, permite la prestación de otros servicios públicos y es estratégico para lograr acciones productivas de la población. La adopción de FNCER para generar energía eléctrica en lugar de combustibles fósiles, sumado a la eficiencia energética, son acciones necesarias para acelerar la descarbonización de la economía. De otra parte, al entregar a los usuarios energía eléctrica limpia, se está cumpliendo con el Objetivo 7 de los ODS, el cual busca “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos”. (Rodríguez A., 2021).

En la Tabla 5. se detalla por departamentos el Índice de Cobertura de Energía Eléctrica (ICEE) en Colombia (UPME, 2018). El significado de las abreviaturas es VCS: Viviendas con servicio y VSS: Viviendas sin servicio. Es importante observar que los ICE más bajos se encuentran en los departamentos más apartados de la región central, con mayores índices de pobreza y carencia de infraestructura en todos los órdenes; son las regiones de Colombia que no están conectadas al SIN (Sistema Interconectado Nacional). En la Tabla 5. el departamento del Chocó aparece con un ICEE del 100%, lo cual desde luego es un error. El Chocó es uno de los departamentos más pobres y excluidos del país.

Las energías renovables son una excelente alternativa para llevar energía eléctrica a estas regiones que forman parte de las ZNI, bajo el modelo de Generación Distribuida que impulsa el gobierno nacional actualmente. La generación distribuida es un concepto macro que puede comprender toda clase de autogeneración o modelo de distribución energético para satisfacer las necesidades de grupos específicos de personas, más cercanos a la fuente de generación, sin recorrer grandes distancias, como lo hace el sistema interconectado. (Arboleda E., España L., Gómez L., 2022). Se trata de sistemas de generación eléctrica de baja potencia, que en su mayoría no están conectados a la red.

ÍNDICE DE COBERTURA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Departamento	Viviendas	VCS_dpto	VSS_dpto	ICEE_dpto
Amazonas	18.510	9.706	8.804	52,44
Antioquia	2'298.014	2'298.014	0	100
Arauca	84.720	77.302	7.418	91,24
Archipiélago de San Andrés	20.646	19.156	1.490	92,78
Atlántico	665.109	614.798	50.311	92,44
Bogotá, D.C.	2'387.752	2'387.752	0	100
Bolívar	608.572	518.192	90.380	85,15
Boyacá	535.302	494.281	41.021	92,34
Caldas	378.507	340.272	38.235	89,90
Caquetá	142.812	113.597	29.215	79,54
Casanare	150.185	141.368	8.817	94,13
Cauca	489.469	422.953	66.516	86,41
Cesar	353.243	288.130	65.113	81,57
Chocó	175.616	175.616	0	100
Cundinamarca	1'108.706	1'065.037	43.669	96,06
Córdoba	511.186	436.672	74.514	85,42
Guainía	11.550	10.585	965	91,65
Guaviare	27.777	22.486	5.291	80,95
Huila	387.436	387.436	0	100
La Guajira	234.997	134.853	100.144	57,38
Magdalena	395.893	272.691	123.202	68,88
Meta	380.330	341.493	38.837	89,79
Nariño	534.915	525.642	9.273	98,27
Norte de Santander	470.396	470.396	0	100
Putumayo	121.897	89.748	32.149	73,63
Quindío	196.482	196.482	0	100
Risaralda	347.524	337.877	9.647	97,22
Santander	779.208	779.208	0	100
Sucre	268.387	238.467	29.920	88,85
Tolima	522.474	511.514	10.960	97,90
Valle del Cauca	1'487.183	1'411.081	76.102	94,88
Vaupés	7.905	2.737	5.168	34,62
Vichada	27.704	13.896	13.808	50,16

Tabla 5. Tomada de (UPME, 2018)

6.1.8 PROYECTOS VIGENTES PARA GENERAR ELECTRICIDAD A PARTIR DE ENERGÍAS RENOVABLES

A mayo de 2023 el país cuenta con 273 proyectos de generación de energía eléctrica a partir de energías renovables (no se cuentan 11 proyectos a base de gas natural, ya que este es un combustible fósil). Tales proyectos muestran el interés del gobierno, de la empresa privada, de la banca y de organismos multilaterales

reconocidos, en apoyar la Transición Energética en nuestro país. En las Tablas 6 y 7 se indican el número de proyectos por tipo de recurso renovable y la potencia de los mismos.

NÚMERO DE PROYECTOS VIGENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES POR RECURSO					
Recurso	Biomasa	Eólico	Hidráulico	Solar	TOTAL
SOL				191	191
Fotovoltaico				191	191
AGUA			53		53
Filo de agua			48		48
Embalse			5		5
VIENTO		28			28
Costa adentro		17			17
costa afuera		11			11
CULTIVO ENERGÉTICO	1				1
Ciclo abierto	1				1
TOTAL	1	28	53	191	273

Tabla 6. *Elaboración propia a partir de datos (UPME,2023)*

POTENCIA DE PROYECTOS VIGENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES (MW)					
Recurso	Biomasa	Eólico	Hidráulico	Solar	TOTAL
SOL				9.864	
Fotovoltaico				9.864	
AGUA			1.952		
Filo de agua			1.205		
Embalse			747		
VIENTO		7.462			
Costa adentro		2.427			
costa afuera		5.035			
CULTIVO ENERGÉTICO	25				
Ciclo abierto	25				
TOTAL	25	7.462	1.952	9.864	19.303

Tabla 7. *Elaboración propia a partir de datos (UPME,2023)*

Los proyectos que se acaban de relacionar están distribuidos geográficamente de acuerdo con la información consignada en la Tabla 8.

PROYECTOS DE ENERGÍA POR DEPARTAMENTO

Departamento	BIOMASA	EÓLICO	HIDRÁULICO	SOLAR	TÉRMICO	Total
ANTIOQUIA			14	3		17
ARAUCA				3		3
ATLANTICO		4		12	6	22
BOGOTÁ D.C.				1		1
BOLÍVAR		3		11	1	15
BOYACÁ				8		8
CALDAS			11	5		16
CASANARE	1			1		2
CAUCA			5	3		8
CESAR				14		14
CORDOBA				30		30
CUNDINAMARCA			1	10		11
HUILA				7		7
LA GUAJIRA		17		5		22
MAGDALENA		4		5	3	12
META				10		10
NORTE SANTANDER				1		1
PUTUMAYO				1		1
QUINDIO			1			1
RISARALDA			11	3		14
SANTANDER			6	7		13
SUCRE				8		8
TOLIMA			2	31		33
VALLE			2	11	1	14
VAUPES				1		1
Total	1	28	53	191	11	284

Tabla 8. Tomada de (UPME,2023)

En la Tabla 8. se tienen en cuenta los proyectos térmicos a base de gas natural, que como ya se mencionó, no es una fuente de energía renovable. No se omite la columna de proyectos térmicos, ya que la tabla es referencia fidedigna tomada de la UPME.

El avance de los diferentes proyectos se determina a través de fases, siendo la Fase 1 la fase inicial y la Fase 3 la final. En la Tabla 9. se observa el estado de ejecución de los proyectos según el tipo de energía renovable.

ESTADO DE AVANCE DE LOS PROYECTOS DE ACUERDO AL TIPO DE ENERGÍA RENOVABLE					
Estado de Avance	Biomasa	Eólico	Hidráulico	Solar	TOTAL
Fase 1		21	31	76	128
Fase 2	1	7	22	109	139
Fase 3				6	6
TOTAL	1	28	53	191	273

Tabla 9. *Elaboración propia a partir de datos (UPME,2023)*

En la Tabla 10 se relacionan los proyectos de energías renovables por departamento, incluyendo únicamente los de mayor capacidad.

POTENCIA DE PROYECTOS POR DEPARTAMENTO* (MW)				
Departamento	Eólico	Hidráulico	Solar	TOTAL
La Guajira	3.649		1.107	4.756
Atlántico	1.295		560	1.855
Córdoba			2.187	2.187
Magdalena	1.658		158	1.816
Bolívar	860		387	1.247
Cesar			1.438	1.438
Tolima		245	1.044	1.289
TOTAL				14.588
* Sólo se listan los proyectos de mayor potencia				

Tabla 10. *Elaboración propia a partir de datos (UPME,2023)*

En la Figura 6. se indica la Potencia (MW) de los proyectos vigentes por municipio.

POTENCIA DE PROYECTOS POR MUNICIPIO

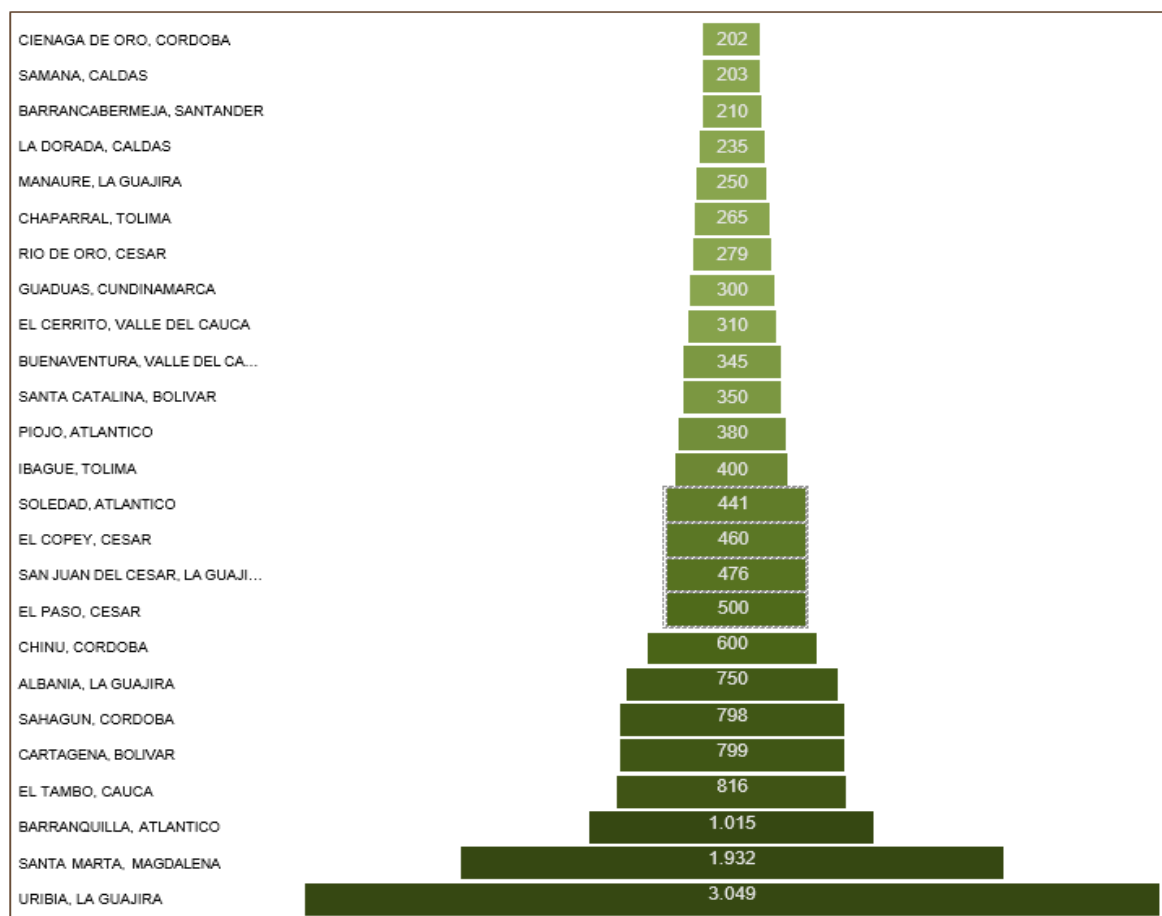


Figura 6. Tomada de (UPME,2023)

Al analizar la información sobre los proyectos de generación de energía eléctrica a partir de FNCER, se encuentran hechos destacables entre los cuales se pueden citar:

1. La mayoría de los proyectos son solares (69.96%), y eólicos (10.26%), ver resultados de la Tabla 6 y los Anexos 1 y 2. Este hecho obedece a las inmejorables condiciones geográficas y meteorológicas que ofrece el país para este tipo de energías renovables, además del avance en estas tecnologías a nivel mundial y local, lo cual reduce los costos y mejora la calidad.
2. La potencia proyectada también en su mayoría corresponde a las fuentes solar (9854 MW) y eólica (7462 MW). Los anteriores valores en porcentaje corresponden respectivamente a 51.10% y eólica 38.66%. Ver resultados de la Tabla 7.

3. La gran mayoría de estos proyectos (eólicos y solares) están ubicados en la costa atlántica (sobre todo en la Guajira y el Atlántico) y también unos cuantos en el centro del país (Ver anexos 1 y 2). En las ZNI apenas hay tres PCHs en Mitú, Bahía Solano y Cupica.
4. El avance de los proyectos es muy lento, de los 273 vigentes sólo hay 6 en fase 3. La mayoría de inconvenientes que impiden la marcha normal de los trabajos están asociados con la oposición de las comunidades nativas, y con trámites como los de las licencias ambientales.

La matriz colombiana de generación de energía eléctrica desde el enfoque de fuentes Renovables & No Renovables al año 2019 (sin la participación de los proyectos en curso), se puede apreciar en la Tabla 11.

MATRIZ COLOMBIANA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA - 2019			
RECURSO ENERGÉTICO	APORTE AL TOTAL DE GENERACIÓN (%)	CATEGORÍA FUENTE	TOTAL CATEGORÍA (%)
Hidráulico	69,69	RENOVABLE	71,07
Biomasa	1,13		
Eólico	0,13		
Solar	0,12		
Combustible fósil	28,93	NO RENOVABLE	28,93

Tabla 11. *Elaboración propia a partir de datos de (Acosta A., 2019).*

6.2 Acciones que se proponen para apoyar el progreso de la Transición Energética

La Transición Energética, la cual significa en términos concretos ir reemplazando de manera gradual los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables, produce además notables cambios en las formas convencionales de generar y consumir energía (dando protagonismo a las fuentes renovables), impacta de manera directa la sostenibilidad ambiental, promueve grandes innovaciones en las relaciones comerciales ya conocidas entre las diversas comunidades económicas, jalona el progreso de las ya bastante avanzadas tecnologías en automatización, redes inteligentes, digitalización, electrificación, nuevos materiales etc. Todos estos cambios exigen enormes esfuerzos de parte de las naciones, las organizaciones multilaterales, las empresas, la academia, y por supuesto de todos los individuos. El objetivo primordial de la Transición Energética es mitigar lo antes posible el preocupante fenómeno del calentamiento global.

El World Energy Council calcula anualmente el denominado Energy Sustainability Index (**ESI**), índice que mide la habilidad de los países para llevar a cabo políticas energéticas sostenibles. Este índice evalúa a cada país en tres dimensiones: la seguridad del suministro energético, la equidad energética y la sostenibilidad ambiental. Estos tres elementos han sido denominados como el trilema energético y denotan los tres frentes de acción en los que la política energética de un país debería actuar. La posición que ocupó Colombia en el ranking del índice general para el año 2014 fue el lugar 16 dentro de 129 países evaluados, lo que significó un ascenso de ocho posiciones frente a lo logrado en 2013, y de diez posiciones frente a lo logrado en 2012. (UPME, 2015). Sin embargo, en la medición del año 2022 Colombia descendió al puesto 42 entre 125 países. La puntuación total disgregada en las diferentes dimensiones para el año 2022 (WEC, 2022) fue:

Puntuación trilema: 64.8 /100

Seguridad energética: 63.7 /100

Equidad energética: 58.3 / 100

Sostenibilidad ambiental: 77.3 / 100

Las anteriores cifras muestran en general un desempeño deficiente del país en la concepción y aplicación de políticas energéticas sostenibles, un rezago importante en la dimensión **Seguridad Energética** y una grave deficiencia en la variable **Equidad Energética**. La implementación de una Transición Energética justa debe impactar de manera positiva el ESI, sobre todo en las dimensiones acabadas de mencionar. Es de la mayor importancia que el país promueva acciones para diversificar su matriz energética, incrementando en la misma una fuerte participación de energías provenientes de fuente renovables. Los resultados inmediatos serían una mayor seguridad energética, mejoramiento de los índices de sostenibilidad ambiental y una mayor cobertura de los servicios eléctricos, particularmente en las poblaciones que habitan las ZNI.

6.2.1 Integración de las energías renovables en la matriz energética nacional

De acuerdo con proyecciones recientes (año 2023) de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), Colombia cuenta apenas con reservas de petróleo para 7.5 años, y de gas natural para 7.2 años (ANH, 2023). Esto quiere decir que, ante el escenario de no continuar con actividades de exploración en búsqueda de petróleo, es urgente seguir incorporando a la matriz energética nacional, de manera pronta y eficiente, fuentes de energía renovables. También es posible el escenario de tener que importar combustibles fósiles, lo cual no solo afectaría la soberanía energética del país, si no también sus finanzas e imagen internacional como una nación que ha hecho grandes esfuerzos por asegurar sostenibilidad ambiental (ver índice ESI). La mejor solución es entonces aumentar la participación de las fuentes renovables

de energía, de modo que se diversifique la matriz energética y sea posible una mayor oferta de energía eléctrica para los usuarios finales.

A partir del análisis de los diferentes proyectos de energías renovables que están vigentes en el país, en lo referente a potencia instalada, ubicación, naturaleza de las fuentes renovables utilizadas, además de las crecientes falencias en equidad y seguridad energéticas, resulta apropiado centrarse en los siguientes nichos de oportunidad:

- Proyectos fotovoltaicos masivos y a diferentes escalas (residenciales, industriales, grandes parques solares)
- Proyectos eólicos en las zonas de alto potencial ya referenciados en las Tablas 2 y 10.
- Proyectos de cogeneración a partir de la energía de la biomasa (Ver Tabla 4.)
- Proyectos de aprovechamiento de la energía Geotérmica (Región volcánica del nevado del Ruíz, zona de influencia de los volcanes Chiles, Cerro Negro y Azufral en la frontera con Ecuador).
- Despliegue prioritario de soluciones energéticas en las ZNI, implementando proyectos de electrificación a partir de energías renovables y / o sistemas híbridos de generación (Solar – Diesel, Solar – Hidrógeno Verde)
- Fabricación y aprovechamiento del denominado Hidrógeno Verde.

6.2.2 Energías Renovables y ZNI

En Colombia existen zonas donde no hay acceso a la energía eléctrica suministrada por el SIN, áreas denominadas zonas no interconectadas (ZNI); estos lugares se caracterizan entre otros aspectos por la riqueza de sus recursos naturales y por sus difíciles condiciones de acceso (Ver Anexo 3). El bienestar de las personas en estas zonas se ve afectado directamente por la ausencia o intermitencia del servicio eléctrico, ya que la energía eléctrica interviene en el desarrollo de la mayoría de las actividades del ser humano, es decir, las prácticas comerciales, de recreación, académicas, laborales, etc., actividades que se ven condicionadas por la irregularidad de este servicio. (Muñoz C., Villamil B., Restrepo A., 2021).

Las Zonas No Interconectadas corresponden a todos los municipios, corregimientos, localidades o caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional (artículo 1 de la Ley 855 de 2003). Estas zonas se ubican mayoritariamente en los departamentos limítrofes y representan el 53% del territorio nacional, con una capacidad instalada del orden de los 311,8 MW, y están compuestas por 18 Departamentos, 5 Capitales Departamentales, 28 Cabeceras Municipales, 77 Municipios y 1.769 Localidades (IPSE, 2022).

Estas comunidades están caracterizadas por su baja densidad poblacional, porque se encuentran geográficamente aisladas, y por lo general se ubican en zonas

altamente biodiversas, sus territorios en muchos casos corresponden a comunidades étnicas con alto nivel de pobreza, problemas de orden público, altos índices de NBI (Necesidades Básicas Insatisfechas), índices de desarrollo económico por debajo del promedio nacional, nivel bajo de consumo de energía, baja calidad y discontinuidad del servicio de energía, baja capacidad de pago y alto nivel de pérdidas debido a la infraestructura de distribución de energía. (Lizarazo C., Martínez D., 2022)

Estas características hacen que los proyectos de interconexión al SIN sean técnica y económicamente inviables, además de los impactos ambientales que conlleva el despliegue de infraestructura, y por tanto, se hace necesario que la prestación del servicio se genere directamente en cada zona. Gracias a la abundancia de recursos naturales, lo pertinente es implementar soluciones energéticas basadas en fuentes renovables de energía.

El departamento con mayor número de municipios con ZNI es Chocó, con el 28,6%; seguido de Nariño, con el 14,3%, y Caquetá, con el 12,1% (Vallecilla, 2022).

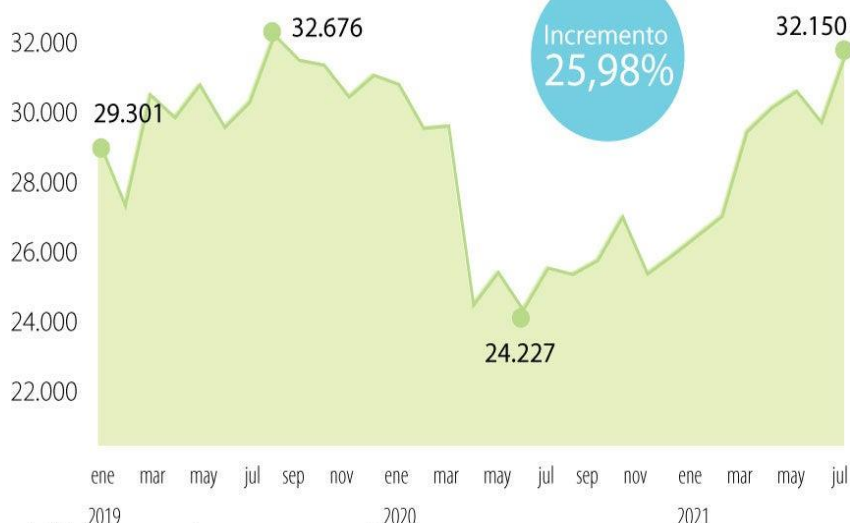
El despacho energético en estas zonas se realiza mayoritariamente con grupos electrógenos Diesel, lo cual corresponde a un 85% de la capacidad instalada de las ZNI, de acuerdo con la caracterización energética realizada por el IPSE. Por otro lado, el 15% restante es atendido por medio de FNCER, las cuales han venido incrementando su participación en estas comunidades (IPSE, 2022) (Torres, Díaz, XUE, & Llanos, 2020).

Como medida preliminar para suministrar soluciones energéticas a las ZNI, basadas en fuentes de energía renovables, es indispensable elaborar estudios de la demanda energética en tales regiones. Se deben hacer mediciones, encuestas y estimaciones para establecer el consumo promedio de energía eléctrica (KWh) correspondiente a los sectores residencial, comercial, industrial (si aplica) e institucional (colegios, puesto de salud, entidades gubernamentales, etc.). Teniendo esta información, el siguiente paso es generar la oferta que cubra la demanda ya conocida. La oferta debe ser generada a partir de energías renovables, no exclusivamente con tecnologías solar y/o eólica. En el país se cuenta prácticamente con todas las fuentes de energía renovables existentes, de modo que es posible y deseable que también haya participación de otras tecnologías como PCH's, Geotérmica, Biomasa y Marina. Desde luego, también hay que tener en cuenta las condiciones geográficas y meteorológicas de cada zona y el potencial de energías renovables propias de las respectivas regiones.

En la Figura 7. se muestra el estado a 2021 de la generación de energía eléctrica en las Zonas No Interconectadas (ZNI) del país.

GENERACIÓN ELÉCTRICA EN ZONAS NO INTERCONECTADAS

Demanda mensual de energía en ZNI (MWh)



Demanda de energía eléctrica promedio en ZNI

1.037 MWh/ día

Incrementó 3,75%

ZNI con disminución en el consumo

Variación kWh

Leticia	0,98%	3,4 millones
Acañí	1,40%	514.513
La Primavera	4,41%	302.496

ZNI con mayor incremento en el consumo de energía eléctrica

	Variación	kWh
Unguía	53,25%	426.751
San Andrés	49,22%	17,9 millones
Ciudad Mutis	16,40%	674.516
Pizarro	12,95%	206.504
Inírida	9,42%	1,5 millones

Capacidad instalada con Fncer en no convencionales

Solar fotovoltaica	20.602 kw
Pequeñas centrales hidroeléctricas	4.275 kw
Residuos sólidos urbanos	1.000 kw
Biomasa	20 kw

Departamentos que más han recibido subsidios (millones)

San Andrés y Providencia	\$36.369
Chocó	\$24.199
Amazonas	\$15.837
Nariño	\$14.812

\$124.854 millones

Subsidios recibidos por las ZNI por parte de la Nación para energía eléctrica

Departamentos con más incremento

Vichada	3,64%
Guaviare	Incremento en costos de distribución para ZNI
Cauca	

1,80% Costo de comercialización

Fuente: Ipse, Asocodis, Creg / Gráfico: LB+VT

Figura 7. Tomada de (SER COLOMBIA – Energías Renovables, 2021)

En la Tabla 12. se muestra un comparativo de fuentes de energía y las respectivas potencias instaladas (KW), para las ZNI a 2021. Se puede apreciar el uso preponderante del Diesel como energético en estas zonas del país, lo cual incide en los altos niveles de contaminación del aire, costos asociados a la compra de este combustible y el transporte del mismo, además de la contaminación acústica debida al ruido de las plantas Diesel. Se aprecia también la muy baja participación de la energía de la Biomasa, la cual debería ser una fuente con mayor presencia, ya que el país cuenta con avances significativos en esta tecnología y materiales aprovechables en abundancia (Ver Tabla 4.)

CAPACIDAD INSTALADA EN FNCER Vs DIESEL EN LAS ZNI		
FUENTE DE ENERGÍA	POTENCIA INSTALADA (KW)	NÚMERO DE USUARIOS
Diesel	269.019	204.748
Paneles solares	20.602	
PCH's	4.275	
Residuos sólidos urbanos	1.000	
Biomasa	20	

Tabla 12. *Elaboración propia a partir de datos (SER COLOMBIA – Energías Renovables, 2021)*

6.2.3 Potencial del Hidrógeno Verde

Los pilares clave de la descarbonización del sistema energético global son la eficiencia energética, el cambio de comportamiento, la electrificación, las energías renovables, el hidrógeno y los combustibles a base de hidrógeno, y el CCUS. La importancia del hidrógeno en el Escenario de Emisiones Netas Cero se refleja en su creciente participación en las reducciones acumuladas de emisiones. El fuerte crecimiento de la demanda de hidrógeno y la adopción de tecnologías más limpias para su producción, permiten que el hidrógeno y los combustibles basados en hidrógeno, desempeñen una contribución significativa en el Escenario de Emisiones Netas Cero para descarbonizar sectores donde las emisiones son difíciles de reducir, como la industria pesada y el transporte de larga distancia. (IEA, 2023).

Entre los diferentes elementos que componen la materia, el hidrógeno es el más liviano y el más abundante. Constituye casi el 90% de la masa visible del universo, en su mayoría en forma gaseosa, constituida por una simple molécula de dos átomos (H_2) que, en una atmósfera rica en oxígeno como la atmósfera terrestre, arde de manera similar al metano. De hecho, entre los combustibles convencionales, es el que cuenta con el mayor contenido de energía por unidad de peso, tres veces mayor que el de la gasolina. El Hidrógeno utilizado en las celdas de combustible, se combina con el oxígeno para producir energía eléctrica y agua (Enel Green Power, 2023). Sin embargo, el hidrógeno no se considera una fuente de energía en sí mismo porque no es posible encontrarlo en forma elemental en la naturaleza; se considera un vector energético porque es necesario realizar un proceso para separarlo de otros elementos –como por ejemplo separarlo del oxígeno cuando se encuentra en el agua– y así convertirlo en energía en una forma útil (Romero A, Martínez J., 2017).

El hidrógeno puede ser producido en prácticamente cualquier lugar, lo que representa un beneficio para las áreas más aisladas. Al liberarse la energía de un kilogramo de hidrógeno no se emite dióxido de carbono, sólo vapor de agua, generando así un impacto ambiental nulo.

Existen distintos métodos de producción de hidrógeno. Según sean la materia prima y la fuente energética utilizada en fabricarlo, se habla de diferentes clasificaciones de hidrógeno (*SER Colombia – Energías Renovables, 2021*). Ver Tabla 13.

CLASIFICACIÓN DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA	
DENOMINACIÓN	FUENTE/TECNOLOGÍA
NEGRO	Su fuente es el carbón, se produce por gasificación y emite Gas Carbónico
CAFÉ	Su fuente es el Lignito, se produce por gasificación y emite Gas Carbónico
GRIS	Su fuente es el gas natural , se produce por SMR*, ATR* u oxidación parcial y emite CO2 y CH4 fugitivo
AZUL	Su fuente es el carbón, el gas natural o el petróleo, cuenta con un post proceso de captura de carbono CCS y emite, en menor medida CO2 y CH4 fugitivo
ROSA	Su fuente es la energía nuclear, se produce con electrólisis y emite residuos radiactivos
VERDE	Su fuente son las energías renovables, se produce por electrólisis y sus emisiones son nulas
BLANCO	Es el único tipo de H2 que se encuentra en la tierra, para obtenerlo se debe hacer uso de infraestructura de recobro empleada en la producción de petróleo o gas

* Existen cuatro opciones principales para capturar CO2 durante la producción de hidrógeno: reformado de metano con vapor (SMR), gasificación del carbón, reformado autotérmico (ATR) y oxidación parcial (POX).

Tabla 13. *Elaboración propia a partir de datos (SER Colombia – Energías Renovables, 2021)*

El hidrogeno se ha utilizado con seguridad durante muchas décadas en la industria; actualmente se producen más de 50 millones de toneladas de hidrógeno al año. Su innovadora aplicación se da en el marco de la descarbonización de la economía; pues el hidrógeno puede ser utilizado como combustible para el transporte y para generar electricidad mediante pilas de combustible (*SER Colombia – Energías Renovables, 2021*).

Debido al tipo de fuentes energéticas utilizadas para su fabricación (energías renovables), el **Hidrógeno Verde** se constituye en la solución ideal para impulsar la Transición Energética. Las dos razones más importantes para el uso del Hidrógeno Verde son su impacto nulo al medio ambiente y su alto contenido de energía por unidad de peso. El Hidrógeno Verde es el combustible indicado para la electrificación, la industria pesada, y el transporte terrestre, aéreo y marítimo.

En Colombia hace varios años se produce hidrógeno; las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena producen 130.000 toneladas anuales de hidrógeno

para reducir el contenido de azufre del diésel y la gasolina, y así mejorar la calidad de los mismos, y desde 2007 la refinería de Barrancabermeja produce un 30% de hidrógeno azul. Por su parte el gobierno a través del Ministerio de Minas y Energía lanzó en octubre del 2021 la hoja de ruta del hidrógeno en Colombia, basada en cinco pilares. (Ministerio de Minas y Energía – Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia, 2021). Ver Tabla 14.

PILARES DE LA HOJA DE RUTA DEL HIDRÓGENO EN COLOMBIA					
PILAR	Reducción de emisiones	Crecimiento económico	Transición justa	Objetivo de país	Comunidades locales
FUNDAMENTO	El hidrógeno como una pieza clave para alcanzar la carbono neutralidad de Colombia	El desarrollo de la cadena de valor como vía hacia una economía de exportación	El hidrógeno como habilitador de una transición energética justa	El gobierno nacional comprometido con el despliegue del hidrógeno de bajas emisiones	El hidrógeno como vía de integración del territorio y herramienta de desarrollo inclusivo

Tabla 14. *Elaboración propia a partir de datos (Ministerio de Minas y Energía, 2021)*

En 2022 el Hidrógeno Verde es incluido en la Ley 1715 de 2014 (por modificación a partir de la Ley 2099 de 2021), como una FNCER, lo cual le da acceso a los beneficios tributarios y financieros que otorga dicha Ley.

Actualmente, la limitación más grande que tiene el hidrógeno verde para su posicionamiento y competitividad, son los costos de producción que llevan a que solo el 5% del hidrógeno que se produce, sea hidrógeno verde (Enel Green Power, 2023), el resto es hidrógeno negro, gris, café o azul. Hoy, cuesta 2 euros -i.e. 2,24 dólares estadounidenses aproximadamente- producir un kilogramo de hidrógeno café, mientras que, cuesta 8 dólares estadounidenses aproximadamente producir un kilogramo de hidrógeno verde (Proost J., 2020).

La barrera de los costos que impide una producción intensiva del hidrógeno verde, gradualmente se irá superando como consecuencia de los vertiginosos avances en Ciencia, Tecnología e Innovación. Esta observación ya se está evidenciando con el hecho de que en Colombia existan tres proyectos piloto de Hidrógeno Verde en operación, uno por parte de Ecopetrol en la Refinería de Cartagena, otro de Promigas igualmente en Cartagena y uno de Opex en Itagüí. Ver Figura 8.

PROYECTOS PILOTOS DE HIDRÓGENO EN OPERACIÓN EN COLOMBIA		
	OBJETIVO: Producción de hidrógeno verde con aplicación en MOVILIDAD. Ubicación : Refinería de Cartagena	Consiste en la operación de un electrolizador de tecnología PEM (Proton Exchange Membrane, por sus siglas en Inglés) de 50 KW y 270 paneles solares. En este proyecto se utilizan aguas residuales de la refinería para producir cada día 20 Kg de hidrógeno verde de alta pureza (99,999%)
	OBJETIVO: Producción de H ₂ V para aplicaciones en investigación, a través de la mezcla con gas natural (blending). Ubicación: Cartagena	En la primera fase producirá cerca de 1.574 Kg anuales de H ₂ V que, mezclados con gas natural y dispuestos en la red de distribución energética, permitirá reducir la huella ambiental de la operación al evitar emisiones de GEI de 6 toneladas anuales
	OBJETIVO: Abastecimiento de vehículos. Ubicación: Itagüi (Antioquia). Primera hidrogena verde de Colombia, abastece a un vehículo de pasajeros con autonomías de cerca de 700 Km, con una capacidad de llenado de 6 Kg	La primera estará funcionando a partir de 2023 y cuenta con una inversión de U\$ 10 millones. Su capacidad de producción será de 1.000 Kg de hidrógeno puro al día, que servirán para atender las celdas de combustibles que demanden los clientes corporativos con fines industriales

Figura 8. Elaboración propia a partir de (LaRepublica.co., 2022)

En la convocatoria del Fondo de Energías No Convencionales y de Gestión Eficiente de la Energía FENOGE +H₂ COLOMBIA, se recibieron un total de 58 solicitudes de financiación para proyectos de producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, re-electrificación y/o usos finales del hidrógeno como materia prima o insumo industrial del hidrógeno verde o azul en Colombia, en etapas de prefactibilidad o factibilidad. Lo anterior da cuenta del interés por parte de inversionistas y emprendedores para desarrollar modelos de negocio con hidrógeno en Colombia (SER Colombia – Energías Renovables, 2021).

El aprovechamiento del Hidrógeno Verde para electrificar la oferta de energía es un punto clave para abordar, pues este producto puede ser almacenado y transportado a lugares de difícil acceso, como pueden ser las Zonas No Interconectadas, y allí producir nuevamente energía y/o electricidad. Inclusive en las mismas ZNI es

posible obtener el Hidrógeno Verde, ya que en estas zonas es abundante el recurso renovable (Solar, Eólico, PCH's), dependiendo de cada región.

La producción de hidrógeno verde representa oportunidades para el desarrollo de proyectos de energía renovable, la descarbonización y descentralización de la economía y la exportación, pues se espera que para 2030 la producción sea de 1550 Kt y para 2050 de 6050 Kt que, comparado con la demanda, pone a Colombia en una posición de potencial exportador (*SER Colombia – Energías Renovables, 2021*).

A nivel de alianzas internacionales para la producción y comercialización de Hidrógeno Verde, Colombia ha establecido importantes convenios con Corea del Sur y Alemania. Corea tiene limitaciones para producir suficiente hidrógeno verde a nivel nacional debido a las pocas opciones que tiene en temas como acceso a la tierra, así como condiciones climáticas. En este orden de ideas, las importaciones de hidrógeno verde a gran escala son inevitables. Se estima que Corea del Sur necesitará 3,9 millones de toneladas de hidrógeno para 2030 y alrededor de 30 millones de toneladas para 2050. De esta cantidad, alrededor de 80% (22 a 24 millones de toneladas), depende de las importaciones. Es por esta razón que Corea será un mercado muy atractivo de exportación de hidrógeno colombiano.

De otra parte, la tecnología de producción de electrólisis de próxima generación (de óxido sólido- Soel/Soec) que está investigando y desarrollando Corea, contribuirá en gran medida a la producción masiva de hidrógeno en Colombia en el futuro, y las futuras tecnologías de almacenamiento y transporte de hidrógeno ayudarían en la exportación de hidrógeno al exterior y a lograr establecer una economía de hidrógeno en una etapa temprana (*LaRepublica.co – Corea un socio estratégico, 2023*).

Con respecto a la cooperación con Alemania, este país y Colombia firmaron en Berlín en junio de 2023, un acuerdo que prevé la cooperación de la Sociedad Fraunhofer, uno de los líderes mundiales en investigación, para analizar la producción de hidrógeno verde y sus derivados para su exportación hacia la nación europea. Los expertos de los dos países han determinado que la Región Caribe de Colombia puede convertirse en una importante zona industrial de hidrógeno, la cual está en capacidad de entregar volúmenes significativos a los mercados locales e internacionales a precios competitivos.

La Sociedad Fraunhofer, establecida en 1949, es la mayor organización de investigación aplicada de Europa. Solo en Alemania comprende 76 institutos y dependencias, y tiene sedes en Estados Unidos, Brasil, Sudáfrica, Israel, China e India. Ha desarrollado en más de 70 años tecnologías como el formato mp3, que se convirtió en un estándar mundial; la bolsa de aire, o airbag, que utilizan los automóviles; y el ordenador cuántico. Uno de los temas principales en los que trabaja actualmente es la tecnología del hidrógeno, incluyendo pilas de combustible que convierten el elemento en electricidad (*Ministerio de Minas y energía, 2023*).

6.2.4 Análisis de los resultados con base en indicadores y proyecciones de demanda

En la Tabla 15 se hace un desglose detallado del ETI (Energy Transition Index, por sus siglas en inglés) para Colombia. Se indican el puntaje total obtenido por el país y el puesto ocupado a 2023 dentro de 120 países. Se aprecian también las dimensiones que componen el mencionado índice con sus respectivos valores diferenciados, y se relacionan las principales oportunidades de mejora que se le presentan al país, a partir de la necesidad de incrementar el valor del ETI.

En la misma Tabla se presentan los valores de las emisiones de CO₂ per cápita a nivel Colombia y a nivel mundial, para tener una referencia actualizada de la magnitud de las emisiones locales comparadas con las del resto del planeta. Se muestran también los índices de avance del ODS 7 (Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna) en Colombia, comparado con el de América Latina y el Caribe.

El índice Multidimensional de Pobreza Energética (Impe) de Colombia se incluye también en la Tabla 15; se trata de un indicador que se mide por primera vez en el país y la organización que se encargó de esta medición es Promigas. El mencionado índice es 18.5%, lo cual quiere decir que a 2023 9.6 millones de colombianos están en condición de pobreza energética (Portafolio., 2023)

En las Figuras 9 y 10 se muestra la matriz de generación de energía eléctrica para Colombia en dos escenarios, en el año 2032 y en el año 2050. Al comparar estas dos matrices se nota el avance sostenido de las energías de origen renovable en el portafolio de energías del país.

Para el año 2032 la matriz de generación de energía eléctrica del país tendrá predominancia del componente renovable (83%) y una pequeña participación de energía de origen fósil (17 % de gas natural). Al año 2050, el cual coincide con el límite para lograr la carbono – neutralidad, Colombia tendrá una matriz energética 100 % renovable. Para ese entonces el país contará en su matriz de generación de energía eléctrica con los aportes de las fuentes geotérmica, nuclear y de hidrógeno verde. Adicionalmente, la capacidad de generación de energía eléctrica del país se multiplicará por cinco, ya que actualmente la capacidad de generación es de 18.9 GW en tanto que en el 2050 se proyecta a 91 GW (CREE., 2022).

En el Anexo 4 se muestran, a nivel global, los indicadores clave para lograr el objetivo 1.5 °C al año 2030; Se presentan los valores actuales de los mencionados indicadores, y los valores que deben tener al año 2030.

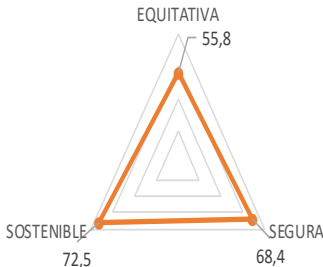
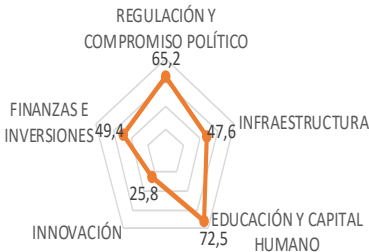
INDICE DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA PARA COLOMBIA AL AÑO 2023				
PUNTAJE DEL PAÍS = 60,5				
PUESTO = 39 (Entre 120 países)				
Variable	Dimensión	Puntaje Dimensión	Puntaje Total	Oportunidades de Mejora
RENDIMIENTO DEL SISTEMA	EQUITATIVA	55,8	65,6	Asegurar el acceso a la electricidad a la población rural, reducir el precio del KWh al sector industrial, enfocar los subsidios al sector residencial
	SEGURA	68,4		Robustecer la matriz energética nacional integrando mayor capacidad de ER, asegurar suministro de gas natural, reducir las pérdidas de energía
	SOSTENIBLE	72,5		Reducir CO ₂ emitido por unidad de energía generada, ampliar la participación de energías limpias
PREPARACIÓN PARA LA TRANSICIÓN	REGULACIÓN Y COMPROMISO POLÍTICO	65,2	53	Asegurar estabilidad jurídica en políticas y regulaciones, incrementar eficiencia energética
	INFRAESTRUCTURA	47,6		Ampliar y robustecer capacidad del sistema de transmisión de energía eléctrica, alistamiento de la infraestructura digital
	EDUCACIÓN Y CAPITAL HUMANO	72,5		Mejorar calidad de la educación, incrementar puestos de trabajo en áreas de energías renovables, capacitar mano de obra calificada en ER
	INNOVACIÓN	25,8		Incrementar inversión pública en Investigación y Desarrollo, fomentar programas de innovación desde la Academia
	FINANZAS E INVERSIONES	49,4		Promover inversión extranjera y local en proyectos ER, facilitar acceso de promotores a los incentivos creados por el gobierno en la Ley 1750 de 2014
Rendimiento del Sistema 			Preparación para la Transición 	
OTROS INDICADORES				
EMISIONES DE CO2 PER CÁPITA (Ton métricas). Año 2021	COLOMBIA	1,6		ÍNDICE MULTIDIMENSIONAL DE POBREZA ENERGÉTICA EN COLOMBIA
	GLOBAL	4,3		
AVANCE ODS # 7*. Año 2022	COLOMBIA	38,90%		Criterios que se tuvieron en cuenta para construir este indicador: acceso y calidad de la energía, Vivienda funcional y liberadora de tiempo, aprender y comunicarse y territorio equipado para el bienestar
	AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE	72%		

Tabla 15. Elaboración propia a partir de datos del (World Economic Forum., 2023)

CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA INSTALADA ACTUAL Y CON APORTES DE LA GENERACIÓN PROYECTADA A 2032

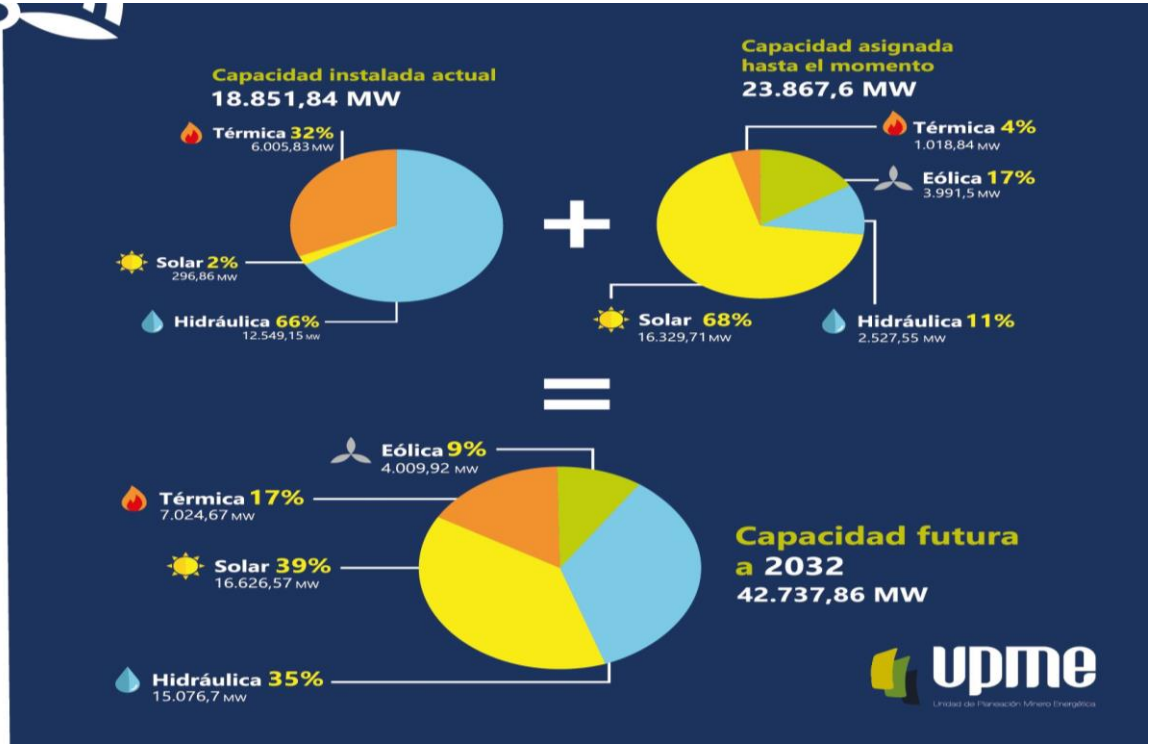


Figura 9. Tomada de (UPME.,2021)

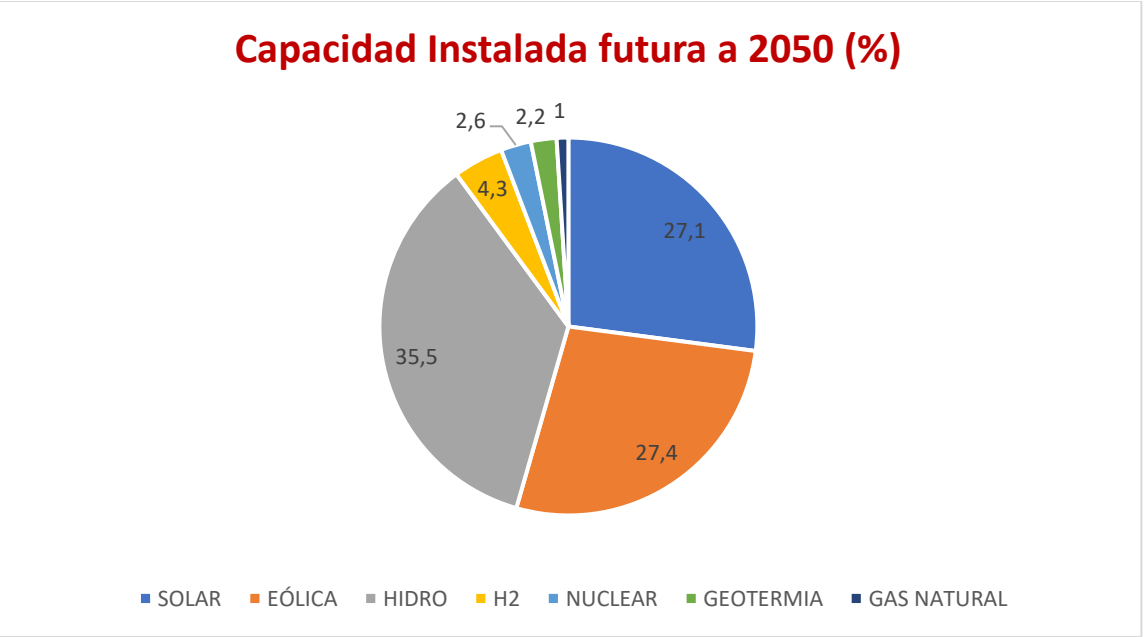


Figura 10. Elaboración propia a partir de datos de (CREE., 2022)

6.3 Panorama de las termoeléctricas en Colombia

Una planta termoeléctrica es una instalación para la generación de energía eléctrica a partir de energía liberada en forma de calor, generalmente mediante la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón, en donde el calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica. Cuando la combustión es de combustibles fósiles, se le conoce como energía convencional, mientras que cuando se emplean otras fuentes de energía como biomasa, se considera una fuente de energía no convencional (FENC). La principal ventaja de las termoeléctricas es que son las centrales de generación de energía menos costosas de construir (teniendo en cuenta precio por MW instalado), en particular las de carbón, debido a la relativa simplicidad de construcción y generación de energía de manera masiva (FEDESARROLLO., 2013).

El principal inconveniente es que esta forma de producción de energía genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de lluvia ácida a la atmósfera, junto con partículas que son nocivas para la salud humana y para la fauna y flora en general. Las plantas termoeléctricas causan problemas al medio ambiente, debido a que los componentes de los gases que generan afectan la vida de los seres humanos, animales y plantas de manera directa. Los principales componentes generados por la combustión son los óxidos de carbono (CO y CO₂), óxidos de azufre (SO₂ y SO₃) y óxidos nitrosos (NO y NO₂), que se derivan de cualquier tipo de combustión. Las emisiones de CO₂ están directamente relacionadas con el efecto invernadero y el calentamiento global. Los SO₂ pueden contribuir a la generación de lluvia ácida y generar enfermedades respiratorias. Adicionalmente, hay otros componentes durante la combustión, como el material particulado (MP), que entre otros contaminantes, tiene un nivel de riesgo alto de generar impactos ambientales negativos (De Castro & Silveira, 2007).

6.3.1 Termoeléctricas a Carbón

A nivel global, las centrales eléctricas de carbón son la mayor fuente de generación de electricidad y la mayor fuente individual de emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, lo que representa un gran desafío para los gobiernos que buscan un camino hacia sistemas energéticos con cero emisiones netas, mientras mantienen una energía segura y asequible (IEA, 2021).

El carbón es el combustible fósil más intensivo en carbono que se utiliza en la generación de energía. Cerca del 30 % de las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía provienen del uso final del carbón (IEA, 2019).

En Colombia, el carbón provee el 7 % de las necesidades energéticas del país (incluyendo energía eléctrica y consumo para la industria). Este mineral es insumo para industrias como la papelería, cementera, química, siderúrgica y de producción de coque (UPME, 2021). Actualmente, el país produce dos tipos de carbón: térmico

y metalúrgico. El carbón térmico es usado como fuente de combustible, quemándose para generar vapor de agua, el cual es posteriormente usado para la generación de electricidad. El carbón metalúrgico, cuyo uso principal es como reductor químico en algunos procesos industriales, normalmente es exportado en su estado natural o transformado en coque. (UPME, 2021).

Las centrales térmicas de generación a carbón, a nivel nacional, se encuentran en su mayoría cerca de la zona donde se ubican importantes reservas de este mineral.

En la Región Central del país, las plantas de generación se encuentran en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. Las dos principales centrales de la región son: Termopaipa y Termozipa. Cada una de estas centrales está compuesta por las unidades de generación que se muestran en Tabla 16. En la mencionada Tabla se aprecian entre otras, las siguientes variables:

Potencia nominal (MW): potencia neta que la unidad de generación está en capacidad de suministrar al sistema.

Eficiencia (%): valor porcentual que da a conocer la capacidad de aprovechamiento del recurso energético. A mayor eficiencia, menor consumo y, consecuentemente, menores niveles de emisión.

TERMOELÉCTRICAS A CARBÓN EN LA REGIÓN CENTRAL DE COLOMBIA				
CENTRAL	POTENCIA (MW)	EFICIENCIA (%)	CONSUMO DE CARBÓN (Ton) - 2015	AÑO-Entrada en Operación
PAIPA 1	31	22,8	86,388	1963
PAIPA 2	72	31,6	260,796	1974
PAIPA 3	70	27,8	220,562	1978
PAIPA 4	154	38,4	466,612	1997
ZIPAEMG2	34	23,3	69,709	1964
ZIPAEMG3	63	26,6	96,444	1972
ZIPAEMG4	64	25,0	118,078	1979
ZIPAEMG5	63	27,7	120,617	1981

Tabla 16. Tomada de (Universidad Distrital., 2020).

A partir del análisis de los datos de la Tabla 16. se observa que las eficiencias de las calderas de estas centrales son muy bajas, lo cual significa un alto consumo de carbón y un gran volumen de emisiones contaminantes. También se nota que estas plantas térmicas ubicadas en la región central del país son muy antiguas (40 años en promedio, aprox.)

En la región de la costa norte de Colombia hay instaladas tres centrales termoeléctricas a carbón. La que está ubicada en la Guajira tiene dos unidades y es la única termoeléctrica dual del país, puesto que funciona a Carbón y a gas. En la Tabla 17. se muestran las principales características de estas termoeléctricas.

Las plantas destacadas con (*) en la Tabla 17. utilizan carbón como combustible principal para su operación y gas natural como combustible secundario y de soporte para el arranque de las unidades (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

TERMOELÉCTRICAS A CARBÓN EN LA REGIÓN NORTE DE COLOMBIA			
CENTRAL	POTENCIA (MW)	AÑO-Entrada en Operación	UBICACIÓN
GUAJIRA 1*	145	2007	Mingueo, Guajira
GUAJIRA 2*	145	2007	Mingueo, Guajira
GECELCA 3	164	2015	Puerto Libertador, Córdoba
GECELCA 3.2	273	2018	Puerto Libertador, Córdoba

Tabla 17. *Elaboración propia a partir de datos de (ANDEG,2023).*

Adicionalmente a las termoeléctricas ya descritas en las Tablas 16 y 17, en el departamento de Santander del Norte hay otras dos centrales térmicas a carbón, cuyas características se indican en la Tabla 18.

TERMOELÉCTRICAS A CARBÓN EN SANTANDER DEL NORTE			
CENTRAL	POTENCIA (MW)	AÑO-Entrada en Operación	UBICACIÓN
Termo Tasajero I	165	1984	San Cayetano
Termo Tasajero II	170	2015	San Cayetano

Tabla 18. *Elaboración propia a partir de datos de (ANDEG,2023).*

La producción de energía eléctrica con destino al SIN en Colombia durante el año 2022 llegó a 76.905 GWh, de los cuales cerca del 15 % corresponde a generación térmica a partir de combustibles fósiles (gas, combustibles líquidos y carbón), y específicamente la participación del carbón fue del 6 % (XM, 2022). La termoelectricidad en el país ha sido concebida principalmente como respaldo energético para la generación hidroeléctrica, por lo que su participación en la producción real ha variado en función de las condiciones meteorológicas del territorio nacional (Flechas Mejía L., Arias Gaviria J., Rueda M., et. al. ,2022). Ver Figura 11.

Participación del Carbón en la generación de energía eléctrica en Colombia

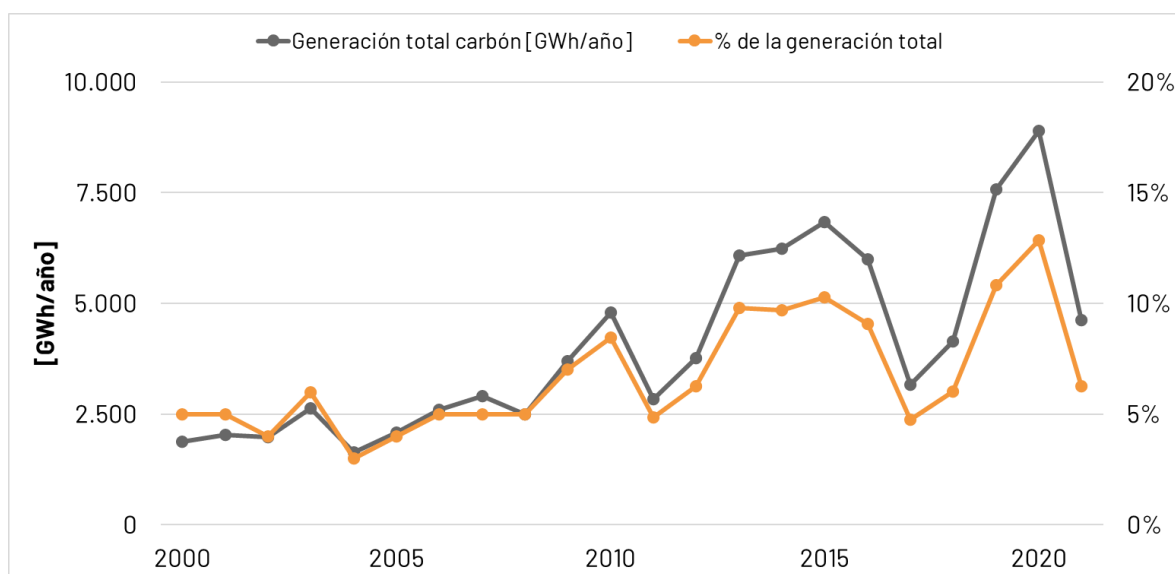


Figura 11. Tomada de (Flechas Mejía L., Arias Gaviria J., Rueda M., et. al. ,2022)

La eficiencia térmica y el tipo de tecnología son determinantes para analizar la energía eléctrica generada por las plantas y su consumo de combustible, que resulta en una mayor generación de emisiones de gases efecto invernadero por la quema del carbón. Los puntos máximos alcanzados de emisiones por generación eléctrica de carbón fueron en los años 2015 y 2020. En el 2015 la generación de 6.523 GWh de energía eléctrica con destino al SIN (10% del total nacional) representó 6,67 millones de toneladas equivalentes de CO₂, y en el 2020 se emitieron 8,77 millones de toneladas equivalentes de CO₂ para una generación de 8.653 GWh de energía eléctrica con destino al SIN (12% del total nacional) Ver Figura 12.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) anuncia de manera anticipada el inicio del fenómeno del Niño a nivel global, para que los diferentes gobiernos tomen las medidas de mitigación del riesgo que consideren pertinentes. En Colombia, la entidad encargada de informar el advenimiento del mencionado fenómeno es el IDEAM. El fenómeno del Niño significa una alta probabilidad de escasez de lluvias, y la consiguiente reducción dramática del nivel de los embalses y de la generación de hidroelectricidad. La anterior contingencia en la generación de energía eléctrica obligará la participación intensiva de las centrales termoeléctricas, para garantizar la seguridad energética del país. El incremento de la generación térmica subirá en forma proporcional las emisiones GEI.

Emisiones de CO₂ por el consumo de carbón para la generación de electricidad

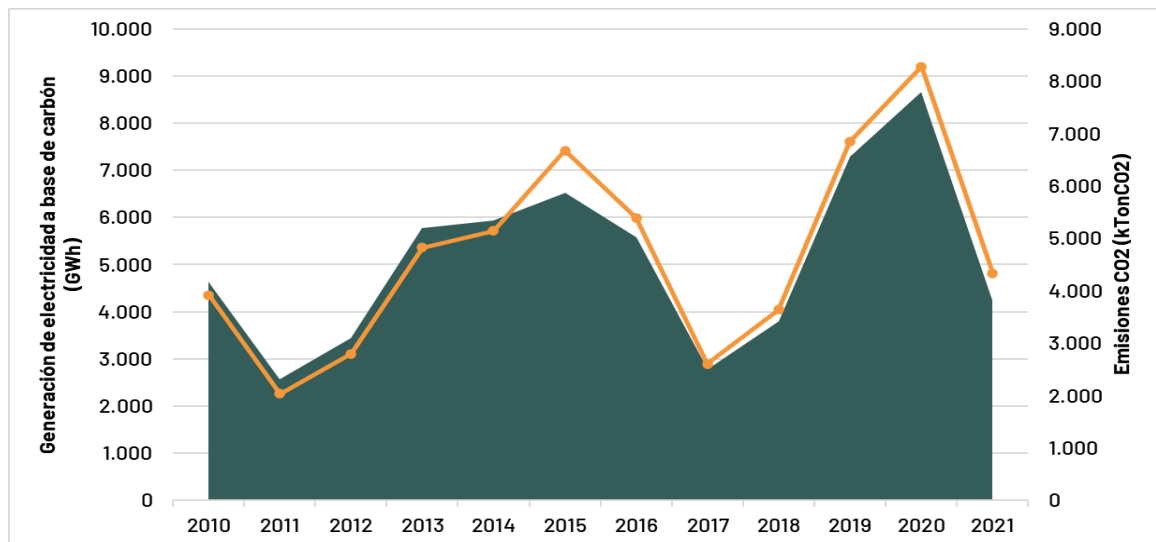


Figura 12. Tomada de (Flechas Mejía L., Arias Gaviria J., Rueda M., et. al. ,2022)

6.3.2 Termoeléctricas a gas

Las plantas termoeléctricas usan diferentes métodos para convertir gas en electricidad. El primer método es quemar el gas en un “boiler” para producir vapor, el cual es usado para mover una turbina que genera electricidad. Otro método, más tradicional, es quemar el gas en una turbina de combustión para generar electricidad. Recientemente, una tecnología que combina los dos procesos mencionados se está implementando cada vez más, ya que alcanza una mayor eficiencia y es una tecnología más limpia (FEDESARROLLO., 2013).

El gas natural es el más limpio de los combustibles fósiles debido a su composición química, pero a pesar de esto tiene impactos ambientales importantes, principalmente por los gases que emite a la atmósfera. Los contaminantes principales son NO_x y CO₂, pero éstos se producen en menor cantidad que con los otros combustibles fósiles. El metano (CH₄), un componente principal del gas natural y un gas de efecto invernadero, es emitido a la atmósfera cuando el gas natural no es quemado por completo. Las emisiones de SO₂ y de compuestos de mercurio no son significativas. También presenta emisiones de hidrocarburos (HC) y de monóxido de carbono (CO). La combustión del gas natural en las turbinas de combustión no requiere de cantidades significativas de agua. Sin embargo, las tecnologías que usan gas-fired boiler y las de ciclo combinado sí requieren agua para el proceso de enfriamiento (FEDESARROLLO., 2013).

En la Figura 13. se representa un listado de las centrales térmicas que generan energía eléctrica a partir del Gas Natural. Se incluye también información sobre las

respectivas ubicaciones geográficas y las correspondientes potencias nominales (MW). Las plantas 4, 9 y 10 de la figura no trabajan con gas natural, pero se incluyen por su valor estratégico a la hora de respaldar la generación hídrica.

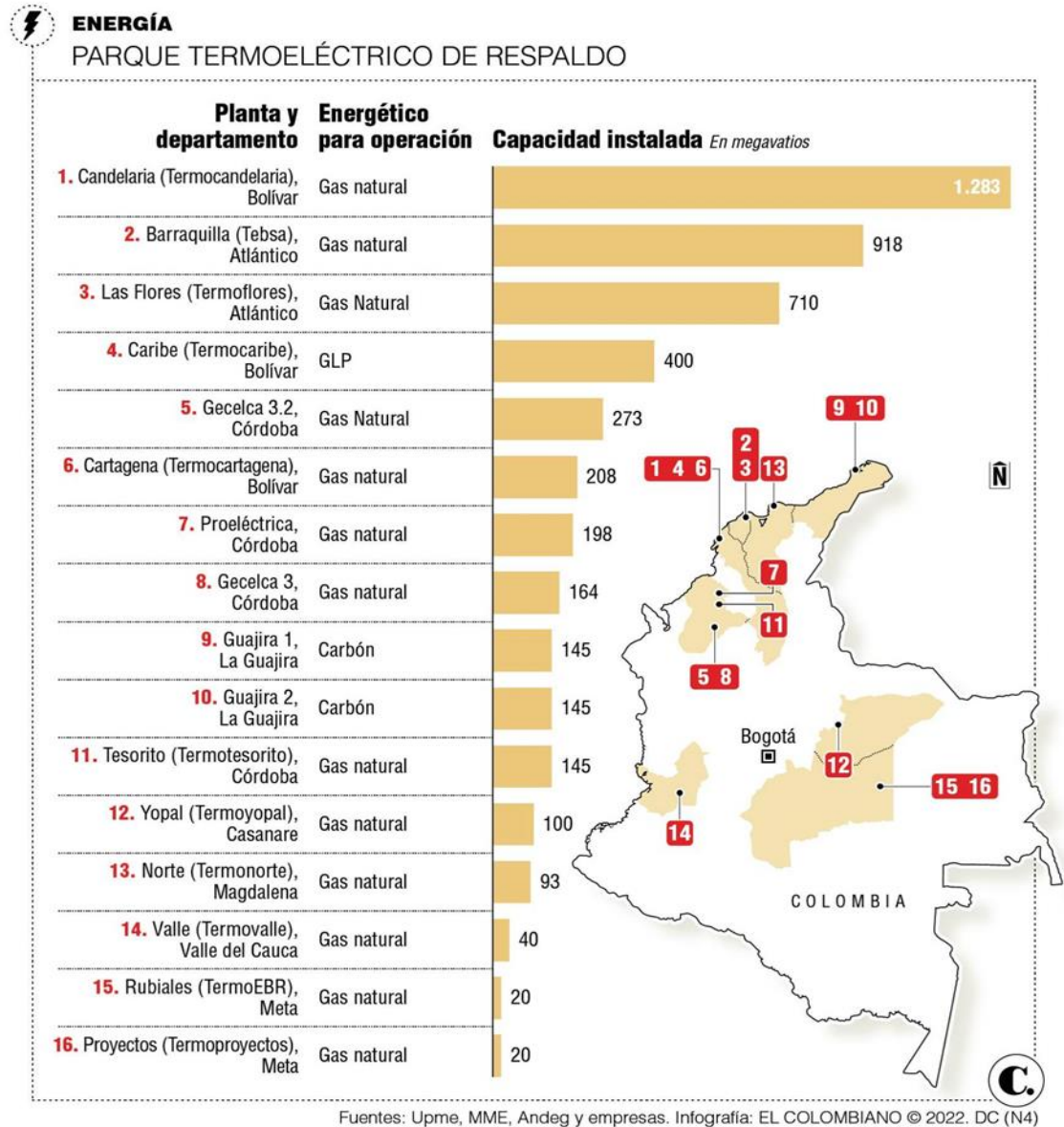


Figura 13. Tomada de (ANDEG,2023).

El gas natural es un componente crucial del proceso de transición energética, ya que ayuda a satisfacer la creciente demanda al mismo tiempo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y mejora la calidad del aire. Es una de las pocas fuentes de energía que puede utilizarse en todos los sectores de la economía mundial. Se utiliza para generar electricidad, proporcionar calor para

procesos industriales esenciales, calentar hogares y transportar personas y mercancías.

Este hidrocarburo emite entre un 45 % y un 55 % menos de gases de efecto invernadero que el carbón cuando se utiliza para generar electricidad, según los datos de la AIE. Hoy en día, las centrales eléctricas de carbón producen alrededor del 40 % de la electricidad mundial, lo que representa más de dos tercios de las emisiones mundiales de CO₂ derivadas de la generación de electricidad. El uso del gas natural en lugar del carbón para generar electricidad puede reducir significativamente la contaminación atmosférica. En comparación con las centrales eléctricas de carbón, las centrales eléctricas modernas de gas natural emiten menos de una décima parte de los contaminantes (Shell-Colombia., 2022).

Sin embargo, la investigación reciente indica que las emisiones de metano, el principal componente del gas natural, que se producen durante su extracción y transporte significan que el gas natural no es tan respetuoso con el clima como se pensaba.

El metano es un poderoso gas de efecto invernadero, aproximadamente 84 veces más potente que el dióxido de carbono medido durante un período de 20 años, por lo que cualquier fuga o emisión de metano deslegitima toda idea de que el gas natural sea un mejor combustible fósil. Por lo tanto, "más limpio" probablemente no sea la mejor palabra para describir el gas natural. En todo caso, siempre y cuando las emisiones de metano asociadas al gas natural estén bien gestionadas, no resulta ser tan problemático en términos de calentamiento global como lo son el carbón y el petróleo (ONU-Programa para el medio ambiente., 2023).

6.3.3 Cierre gradual de las centrales termoeléctricas a Carbón

Con el propósito de alcanzar la carbono neutralidad a 2050, se requiere de la eliminación en el corto plazo del uso del carbón para la generación de electricidad. De modo complementario, es necesario un importante esfuerzo en la diversificación de la matriz energética, integrando a la misma la energía eléctrica proveniente de las FNCER.

La descarbonización responsable de la economía requiere una eliminación gradual de la generación de energía eléctrica a partir del carbón, por lo que las estrategias y hojas de ruta deben definir claramente la tendencia decreciente del papel del carbón en la transición a la carbono neutralidad, y al mismo tiempo, garantizar un suministro seguro de electricidad (Holt, 2022). Colombia ya cuenta con los elementos para planificar la eliminación gradual de las centrales termoeléctricas que utilizan carbón: compromisos climáticos ambiciosos, reducción del interés de los inversionistas en nuevos proyectos de centrales eléctricas de carbón, capacidad instalada de alternativas para la energía de respaldo, y una cartera importante de proyectos de energía renovable que serán instalados en los próximos 10 años (Transforma, 2021)

En un escenario de cierre progresivo de operaciones de las termoeléctricas a base de carbón, deben considerarse diferentes criterios como capacidad instalada a reemplazar (MW), niveles de eficiencia térmica y obsolescencia tecnológica. Los dos últimos están directamente relacionados con la edad de operación de las plantas, pues, las centrales eléctricas son construidas para una vida útil de 30 a 40 años (Vogt, 2018). La Figura 14 muestra el promedio de edad de la capacidad termoeléctrica instalada del país. En Colombia, seis de las plantas activas están en un rango de 40 a 59 años de vida, cuya eficiencia térmica es en promedio del 30%. Estas plantas utilizan tecnología principalmente de combustión de carbón pulverizado con calderas subcríticas de baja presión, dado que la capacidad de las unidades existentes es inferior a 165 MW. Estas plantas debido a su antigüedad, baja eficiencia y altas emisiones GEI, deberían ser la primeras en clausurarse.

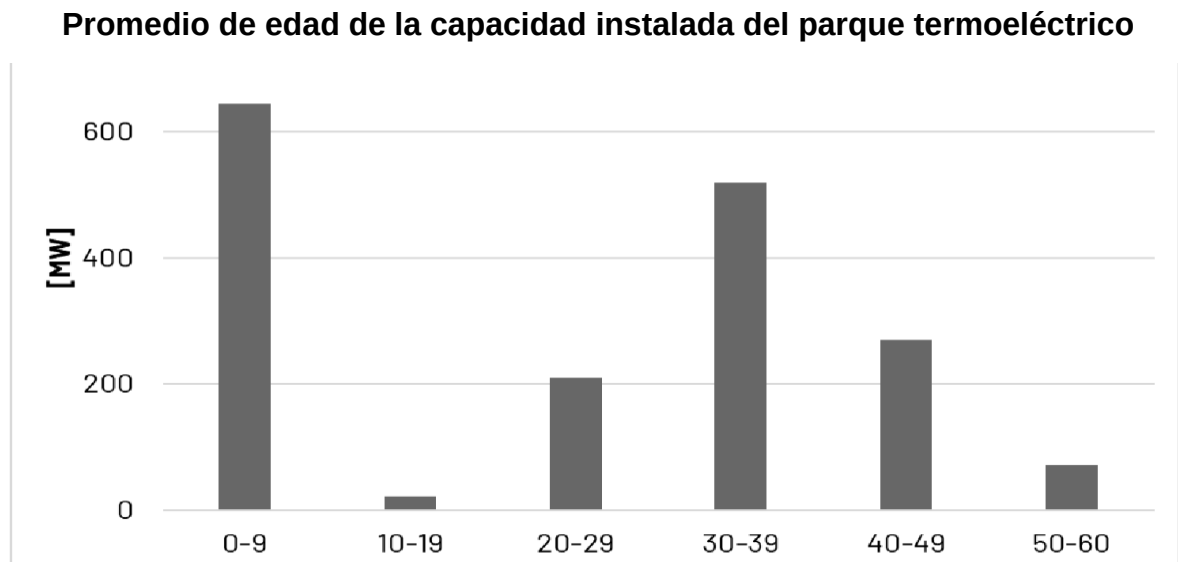


Figura 14. Tomada de (XM., 2022)

El cierre paulatino de las centrales termoeléctricas a carbón se daría con base en los escenarios 180° y 90° propuestos por los expertos (Flechas Mejía L., Arias Gaviria J., Rueda M., et. al., 2022). De acuerdo con los citados autores, la capacidad efectiva neta irá disminuyendo gradualmente con la salida de cada planta (Figura 15), la cual será reemplazada con un esfuerzo adicional en instalaciones de capacidad de FNCER, la cual es calculada a partir de las proyecciones de generación eléctrica a base de carbón del Plan de Expansión de Generación, estimando así la capacidad instalada de FNCER adicional que se requerirá para cubrir la salida del carbón, utilizando un factor teórico de plantas renovables (eólica y solar) promedio de 30 %. En este modelo se le da mayor relevancia a las energías solar y eólica debido a que se trata de tecnologías maduras, y al gran potencial que tienen estas energías prácticamente en todo el país.

Capacidad instalada en carbón: histórica y proyecciones de eliminación gradual

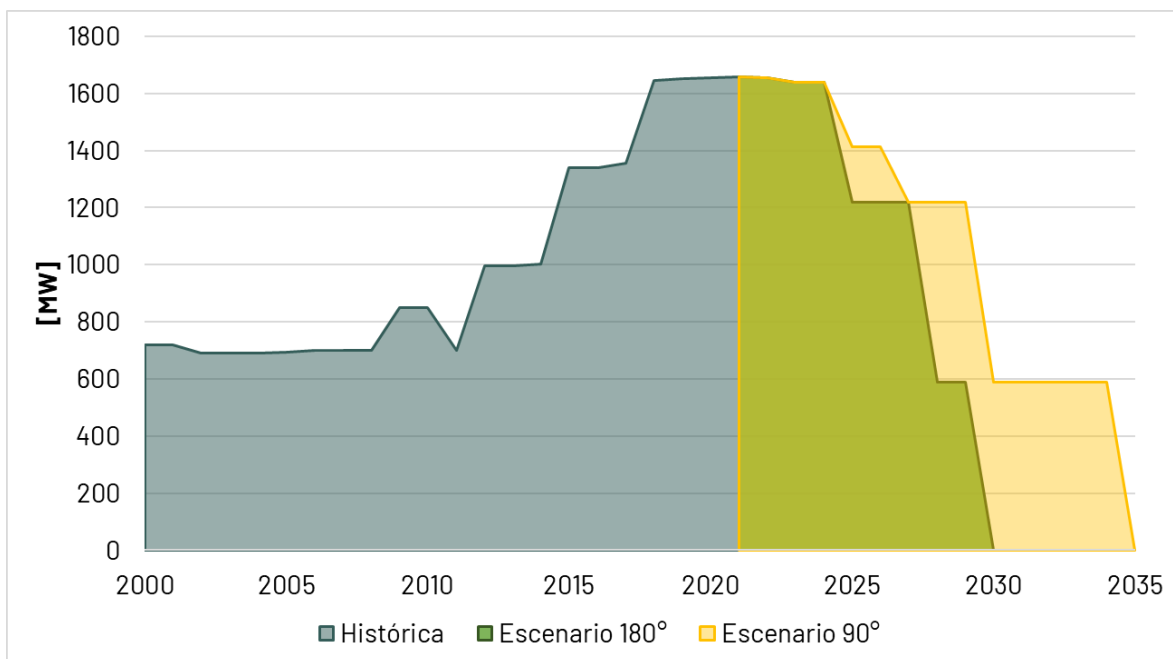


Figura 15. (Flechas Mejía L., Arias Gaviria J., Rueda M., et. al. ,2022)

A continuación, en la Figura 16 se presentan los supuestos y resultados estimados para los dos escenarios de eliminación gradual del carbón en la generación eléctrica de Colombia, con fechas estimadas para 2030 y 2035 (Flechas Mejía L., Arias Gaviria J., Rueda M., et. al. ,2022).

Parámetros para la salida de las plantas termoeléctricas de carbón	
1. Eficiencia térmica 2. Antigüedad 3. Obligaciones de energía en firme	
Supuestos para los escenarios 180° y 90°	
	
○ 2030: Fecha máxima de salida de las plantas termoeléctricas de carbón ○ Escenario de referencia 2 del PERG 2020-2034: ● Entrada Ituango: 2400 MW ● Expansión fija térmica: 80 MW ● Expansión fija FNCER: 3391 MW ● Expansión adicional FNCER: 2628 MW ○ Factor teórico de potencia de plantas renovables (eólica y solar) promedio de 30 %. ○ Los proyectos de generación con FNCER considerados en el plan de expansión de la UPME entran oportunamente. ○ Entran proyectos de FNCER adicionales, lo que permite diversificar las fuentes de energía renovable. ○ Existen las condiciones para eliminar las plantas de carbón a 2030.	○ 2035: Fecha máxima de salida de las plantas termoeléctricas de carbón ○ Escenario de referencia 1 del PERG 2020-2034: ● Entrada Ituango: 1200 MW ● Expansión fija térmica: 80 MW ● Expansión fija FNCER: 3391 MW ● Expansión adicional hidráulica: 380 MW - ● Expansión adicional FNCER: 5628 MW ○ Factor teórico de potencia de plantas renovables (eólica y solar) promedio de 30 %. ○ Antes de 2030 solo entran los proyectos renovables con obligaciones de energía firme, y considerados en el plan de expansión de la UPME.

Figura 16. Tomada de (Flechas Mejía L., Arias Gaviria J., Rueda M., et. al. ,2022)

El PERG 2020-2034 es el Plan de Expansión de Referencia de Generación y Transmisión para el período 2020 – 2034 de la UPME.

Con base en los dos escenarios previamente descritos, la salida de las centrales termoeléctricas a carbón se daría aproximadamente en las fechas descritas en la Tabla 19.

ESCENARIOS DE SALIDA DE SERVICIO DE LAS TERMOELÉCTRICAS A CARBÓN

Central térmica	Año entrada	Capacidad instalada (MW)	Eficiencia térmica	Obligaciones energía en firme	Cierre escenario 180°	Cierre escenario 90°
COLTEJER 1	2006	2	31%	NA	2022	2022
PROENCA II	2017	17	34%	NA	2022	2023
ZIPAEMG 4	1981	64	26%	2025	2025	2025
ZIPAEMG 5	1985	63	27%	2025	2025	2025
PAIPA 1	1963	36	27%	2025	2025	2025
ZIPAEMG 3	1976	63	29%	2025	2025	2025
ZIPAEMG 2	1964	36	30%	2025	2025	2027
PAIPA 2	1975	72	32%	2025	2025	2027
PAIPA 3	1982	70	33%	2025	2025	2027
ARGOS TOLUVIEJO	2016	6	31%	NA	2025	2027
ARGOS YUMBO	2016	10	31%	NA	2025	2027
TASAJERO 2	2015	170	34%	2025	2028	2030
GUAJIRA 1	1983	145	34%	2025	2028	2030

Central térmica	Año entrada	Capacidad instalada (MW)	Eficiencia térmica	Obligaciones energía en firme	Cierre escenario 180°	Cierre escenario 90°
GUAJIRA 2	1987	145	35%	2025	2028	2030
TASAJERO 1	1985	165	37%	2025	2028	2030
ARGOS SOGAMOSO	2018	5	31%	NA	2028	2030
GECELCA 3	2015	164	34%	2022	2030	2035
GECELCA 32	2018	273	39%	2022	2030	2035
PAIPA 4	1999	160	39%	2025	2030	2035

Tabla 19. Tomada de (Flechas Mejía L., Arias Gaviria J., Rueda M., et. al. ,2022).

7. IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO DEL TRABAJO DE GRADO

Este trabajo es una propuesta desde la Academia que pretende generar un impacto sobre los individuos, y entre éstos los tomadores de decisiones, en el sentido de generar en los mismos cambios en los hábitos de consumo de energía. Cambios específicamente en la demanda intermedia y final de energía. Es indispensable para el planeta y todos los seres que lo habitan, que los usuarios de todas las formas de energía sean más eficientes y responsables en el uso y aprovechamiento de los recursos energéticos.

A nivel de los diferentes sectores económicos (transporte, industria, agricultura, ganadería, comercio, etc.), es importante que a partir del conocimiento de la realidad energética de nuestro país, se generen proyectos cuyo objetivo sea integrar de manera sostenida y efectiva fuentes renovables de energía a la matriz energética del país. Este también es un impacto esperado, y se puede lograr a través de la divulgación profusa y organizada de este tipo de documentos.

Las grandes transformaciones sociales toman tiempo y se van gestando en la medida en que las personas y los gobiernos se hacen conscientes de sus deberes y derechos. Este trabajo, en la medida en que se realicen las recomendaciones que se proponen, tendrá impacto en:

1. Mejoramiento de la calidad de vida de la población
2. Reducción de la pobreza energética
3. Generación de empleo verde
4. Preservación del medio ambiente
5. Mitigación del cambio climático
6. Promoción de una cultura de responsabilidad compartida y de solidaridad con las generaciones futuras

8. RECOMENDACIONES

Con base en la metodología **BSC** (Balance Score Card) o Cuadro de Mando Integral, la cual permite una gestión estratégica en pro de lograr unos objetivos claramente definidos e interrelacionados, se muestran a continuación las recomendaciones de este trabajo de grado. Las mencionadas recomendaciones están organizadas en las dimensiones Financiera, Grupos de Interés, Procesos Internos y Aprendizaje y Desarrollo. Todas estas fases están conectadas mutuamente a través de relaciones causa – efecto. A través de la definición de indicadores de gestión, este modelo gerencial facilita el trabajo exitoso en equipo de diferentes personas y organizaciones con sus propios niveles de conocimiento y participación.

Una breve descripción de las dimensiones que componen el modelo BSC se muestra a continuación:

Financiera: Cómo conseguir ingresos, minimizar costos y financiar los proyectos

Partes interesadas: Se refiere a quienes se van a beneficiar con los proyectos. En este caso la población colombiana en general

Procesos internos: Lo que se realiza por parte del gobierno, las empresas, los gremios, la academia, las organizaciones multilaterales, para cumplirle a las partes interesadas

Aprendizaje y crecimiento: Se refiere a la promoción del capital humano, del capital organizacional, del fomento de la innovación, la investigación y la tecnología, de las personas encargadas de los procesos internos

En la Tablas 20 a 24 se resumen las recomendaciones asociadas con cada una de las dimensiones ya citadas, mostrando las razones de cada acción propuesta, sus correspondientes KPIs, y las entidades a cuyo cargo estarían asignadas las diferentes acciones.

8.1 Dimensión Financiera

ACCIONES A IMPLEMENTAR	PORQUÉ?	KPIs	ENCARGADOS
Asegurar la financiación para los nuevos proyectos de generación de energía basados en fuentes renovables	La Transición Energética exige de grandes inversiones que deben ser financiadas. Los países en desarrollo carecen de recursos para financiar la TE y los países desarrollados, causantes en gran proporción de la crisis climática, están en condiciones de colaborar con este financiamiento.	1. Montos de inversión en mitigación, adaptación y eficiencia energética. 2. Impacto de las inversiones en reducción de emisiones de GEI, desarrollo, empleo, etc.	Fondos públicos, Organismos multilaterales, fondos internacionales, financiación directa de países desarrollados, Políticas públicas a través de iniciativas como el impuesto al carbono
Asegurar la financiación para los proyectos cuyo objetivo sea mejorar la eficiencia energética por parte de los diferentes consumidores			
Asignarle un precio al carbono alineado con las metas de mitigación del cambio climático, e ir eliminando en el corto plazo los subsidios a los combustibles fósiles*	Las emisiones de GEI son muy costosas para la sociedad en términos de impacto ambiental y salud de la población. Crear un impuesto al carbono, un registro obligatorio de emisiones, un cupo permitido de emisiones, etc., desincentiva la emisión de GEI, Y genera recursos para financiar la descarbonización de la economía	1. Cuotas diferenciadas de carbono en un período determinado. 2. Impuesto al carbono	Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MMADS). Congreso de la República
Sincronizar la Transición Energética con la consecuente Transición Fiscal	Los ingresos de Colombia dependen en gran medida de la explotación del petróleo y demás recursos asociados, lo mismo que de la minería del carbón. Dejar de percibir estos dineros en el corto plazo afectaría gravemente las finanzas del país, y a las regiones que dependen de las regalías de estos recursos. Debido a la alta limpieza de nuestra matriz energética (70% aprox. de aporte hídrico), se debe dar cumplimiento a los contratos de exploración y explotación de hidrocarburos ya firmados. Se debe continuar con la explotación de petróleo, gas natural y carbón, dando prioridad a la exportación del carbón y del petróleo, a la par que se incremente la generación de energía limpia en el país.	1. Barriles de petróleo exportados en un determinado período de tiempo. 2. Toneladas de carbón exportadas en un determinado período de tiempo. 3. Cuantificación de las regalías a las regiones por concepto de los dos ítems anteriores. 4. Cantidad de KWh de origen renovable que entren al SIN.	MME, UPME, CREG, Ecopetrol, Petroleras

Tabla 20. *Elaboración propia a partir de datos de (CREE., 2022)*

8.2 Dimensión Grupos de Interés

ACCIONES A IMPLEMENTAR	PORQUÉ?	KPIs	ENCARGADOS
Construir relaciones de confianza entre comunidades, gobierno y empresas para sacar adelante los proyectos con oportunidad y calidad	La mayoría de proyectos de generación de energía basados en fuentes renovables no avanzan o fracasan, debido a una deficiente gestión con las comunidades locales, para que éstas comprendan y acepten la construcción y operación de los diferentes proyectos de generación y transmisión en sus predios	1. Expedición de la reglamentación requerida 2. Definición de tiempos para licenciamiento y consultas 3. Retrasos en los proyectos atribuibles a problemas del entorno	Gobierno nacional, gobiernos locales, comunidades vecinas de las zonas influenciadas por los proyectos, empresas de energía
Garantizar acceso a la energía a las poblaciones que carecen de ésta, o que la tienen de manera intermitente y de baja calidad. Esta acción está directamente alineada con el ODS # 7.	Una TE que no se ocupe de quienes no tienen acceso a la energía va a carecer de legitimidad. Colombia cuenta todavía con cerca de 500,000 familias que no tienen acceso a energía. La falta de acceso a la energía es una condena a la pobreza. La contaminación al interior de los hogares por cocinar con leña genera enfermedades cardiorrespiratorias que afectan desproporcionadamente a mujeres y niños. La búsqueda de leña para cocinar inhibe la participación de la mujer en el mercado laboral	1. Reducción de hogares sin acceso a energía 2. Número de proyectos a base de fuentes renovables o híbridos aprobados para las ZNI. 3. Avance del ODS # 7 en Colombia.	MME, MHCP, DNP, Operadores de Red, UPME, Empresas prestadoras del servicio
Asegurar la inclusión productiva de los grupos vulnerables que pierden con la TE y la generación de nuevos empleos	La TE va a generar ganadores y perdedores. Los perdedores son quienes derivan su sustento de la producción o el consumo de fuentes de energía fósiles que se van a reemplazar por energías renovables	Número de programas de transición productiva diseñados e implementados	MME, MHCP, DNP, SENA, Gobiernos locales, Comunidades afectadas

Tabla 21. *Elaboración propia a partir de datos de (CREE., 2022)*

8.3 Dimensión Procesos Internos

ACCIONES A IMPLEMENTAR	PORQUÉ?	KPIs	ENCARGADOS
Multiplicar mínimo cinco veces nuestra capacidad actual de producir energía de bajas emisiones	La disminución de emisiones GEI y la ampliación del portafolio de fuentes renovables de energía conlleva a una electrificación masiva de los usos finales de energía. Este incremento de la demanda hace necesario que el país multiplique por lo menos cinco veces su capacidad de generar energía eléctrica a partir de fuentes limpias.	1. Proyectos aprobados de Transmisión. 2. Proyectos aprobados de generación a partir de fuentes renovables. 3. Intensidad de carbono de la energía eléctrica (gCarbono/KWh)	MME, UPME, CREG, Generadoras, Empresas de Transmisión, Empresas de Distribución
Asegurar la adopción oportuna y a gran escala de tecnologías eficientes y bajas en carbono en todos los sectores especialmente en el transporte	El Transporte contribuye de manera creciente en la emisión de GEI: al aumentar la población y el PIB también se incrementa la movilidad de personas y de productos. El sector Industria es el que más emite GEI después del Transporte. La adopción de nuevas tecnologías es indispensable para hacer posible la TE. Estas son, fundamentalmente, baterías, hidrógeno azul y verde, CCS, digitalización SMR	1. Participación de la flota eléctrica. 2. Emisiones del sector transporte. 3. Consumo energético final en el transporte. 4. Consumo de energía en la Industria. 5. Emisiones sector Industria. 6. Producción de Hidrógeno Verde	Gobierno Nacional/Congreso, Entes Territoriales, Industrias y empresarios, Centros de Investigación, Compañías de servicios de energía.
Asegurar la disponibilidad del gas natural para la transición	El gas natural es versátil (puede servir de vector energético y consumirse en estado líquido y gaseoso) y tiene menores emisiones de GEI por unidad energética que todos los demás combustibles fósiles. Es un producto progresivamente transable y sus cadenas de oferta (producción, transporte por ductos, barco o camión, redes de distribución ampliamente desplegadas), suministran energía densa para una diversidad de usos finales. Las tecnologías de oferta y demanda de gas tienen una amplia tradición de ingeniería y se pueden diseñar de manera modular. Para asegurar una TE a mínimo costo, el país debe tener certeza de la oferta de mediano plazo que le permita al gas duplicar a 2040 su participación en la demanda final de energía.	1. Participación del Gas en las diferentes canastas de consumo. 2. Emisiones GEI evitadas debido al uso del gas natural	MME, UPME, CREG, Transportadoras, Empresas distribuidoras, inversionistas, Usuarios

Tabla 22. Elaboración propia a partir de datos de (CREE., 2022) y (FEDESARROLLO, 2022)

8.4 Dimensión Aprendizaje y Crecimiento

ACCIONES A IMPLEMENTAR	PORQUÉ?	KPIs	ENCARGADOS
Incrementar el conocimiento, las capacidades de investigación e innovación nacionales y el contenido local de bienes y servicios	Se requieren nuevos conocimientos y capacidades para migrar del sistema energético actual a uno de menor intensidad de carbono, esto es, para desarrollar e implementar nuevas fuentes, tecnologías en toda la cadena de valor de los energéticos; para alcanzar una participación activa de los consumidores (la demanda) en los mercados de energía y un uso más eficiente en todos los procesos de uso, transformación, e incluso de producción; sustituir ingresos de actividades extractivas mediante la producción y exportación de bienes con valor agregado e insumos y activos para esta industria; generar nuevos empleos en municipios y regiones vulnerables por la transición energética; conocimiento y aplicación de nuevos modelos de negocio que faciliten los procesos de generación y compraventa de energía a todos los niveles.	1. Oferta educativa pública y privada de calidad en las áreas de desarrollo sostenible, energías renovables, modelos de negocio y eficiencia energética. 2. Presupuesto nacional para educación, innovación, ciencia y tecnología 3. Alianzas y convenios internacionales para fortalecer la investigación en energías renovables	Universidades, Centros de Investigación, SENA, MEN, MCyT, MINTIC

Tabla 23. *Elaboración propia a partir de datos de (CREE., 2022)*

9. CONCLUSIONES

Colombia tiene grandes oportunidades en cuanto al aprovechamiento de energías renovables no convencionales, y puede llegar a ser un líder mundial debido a su ubicación geográfica y a su potencial de generación de energía eólica, solar, y de biomasa (entre muchas otras). No obstante, no solo los recursos con los que cuenta son un factor clave, la TE debe ir apalancada de una estrategia que contemple normatividad e incentivos viables y de fácil aplicación, alianza con las comunidades entendiendo sus necesidades y velando por su sostenibilidad y desarrollo, inversión en infraestructura y tecnología, emisión de normatividad técnica aplicable, y de colaboración entre empresas del sector privado y las diferentes entidades del Estado, en pro de los intereses energéticos del país.

Antes de acometer proyectos de generación de energía a partir de fuentes renovables, es indispensable hacer un trabajo amplio, detallado y responsable con las comunidades que viven en las regiones en las cuales se pretenden desarrollar los proyectos. El objetivo es lograr la participación de las comunidades en los proyectos, que éstas comprendan los beneficios económicos y sociales que van a disfrutar una vez los proyectos inicien y luego en su fase operativa. Precisamente la mala gestión con las comunidades se ha convertido en el obstáculo mayor para el éxito de los proyectos de generación de energía basados en FN CER.

La implementación de la TE depende en gran medida de la existencia y capacidad de líneas de transmisión que conecten los sitios donde se genera la energía limpia, con el SIN. Con el aumento de la población y el necesario incremento en su calidad de vida, la demanda de energía va a crecer de una manera veloz y sostenida. Este hecho exige una mejor infraestructura en Transmisión y Distribución de la energía eléctrica. A manera de ejemplo, actualmente la línea de transmisión Colectora, cuyo propósito es llevar la energía eléctrica generada en los siete parques eólicos de la Guajira al SIN, está en fase de inicio luego de un importante tiempo de retraso. Para poder arrancar el proyecto Colectora fueron necesarias más de doscientas consultas previas con las comunidades por cuyos predios pasa la línea de transmisión. En otras palabras, sin transmisión no hay transición.

La eficiencia energética es un mecanismo para asegurar el rendimiento energético, puesto que se sustenta en la adopción de nuevas tecnologías y mejores hábitos de consumo, con el fin de optimizar el manejo y uso de los recursos energéticos disponibles. La eficiencia energética es una de las mejores vías para aumentar la productividad y competitividad nacional, y es una de las principales estrategias de mitigación de los impactos ambientales en la cadena energética.

La integración de las energías renovables en la matriz energética del país, si bien es un aspecto de suma importancia para ir logrando la descarbonización de la economía, también cumple con la función de diversificar el portafolio de energía que ofrece el país. De esta forma, se cumple también con un objetivo social el cual es asegurar el suministro continuo y sostenible de energía eléctrica a todos los usuarios finales, incluyendo también a las comunidades que habitan las ZNI.

Es importante, con el ánimo de facilitar una TE justa, promover los modelos de negocios novedosos que han surgido con ésta. A nivel mundial, incluida Colombia, uno de los modelos de negocio más exitoso es el PPA (Power Purchase Agreement, por sus siglas en inglés) el cual consiste en la compraventa de energía limpia a largo plazo, a precios favorables y sin ninguna inversión por parte del usuario ya que la financiación corre por cuenta de la empresa promotora. Otro modelo muy apropiado para el país son las denominadas comunidades energéticas. Se trata de modelos de negocios que acogen a los interesados para el desarrollo de proyectos de energía comunitaria, mediante los cuales se concretan distintos esquemas de participación financiera y de propiedad, grados de codeterminación, regímenes de decisión, voto, responsabilidad, a más de transformaciones culturales profundas. Bajo tal esquema los ciudadanos son propietarios, participan o controlan la producción, venta, distribución y uso de la energía bajo estructuras no corporativas o sin ánimo de lucro.

REFERENCIAS

Acosta A. (2022). El gas natural: el combustible puente de la transición energética. <https://viva.org.co/cajavirtual/svc0792/articulo07.html>

Acosta A. (2019). La apuesta por las energías renovables.

Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, (2023). Informe de reservas y recursos contingentes de hidrocarburos.

<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/>

ALLPE Ingeniería y medio ambiente S.L, (2019). Energía Mareomotriz y medio ambiente.

Asociación Nacional de Empresas Generadoras ANDEG. (2023). Tecnologías, ubicación y capacidad instalada.

<https://www.andeg.org/>

Arboleda E., España L., Gómez L. (2022). Energía social y transición energética en Colombia.

Babarinde, F.; ADIO, M (2022). A Review of Carbon Capture and Sequestration Technology. Journal of Energy Technology and Environment, p. 1-11, 2020

Banco Mundial. (2022). Energy Overview.

<https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview#3>

Barbosa L., Hamzagic M. (2022). Estrategias para la transición energética: revisión de la literatura. <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/sem-categoria-es/transicion-energetica>

BBVA. (2023). ¿Qué es la transición energética? Un camino inevitable lleno de retos. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-transicion-energetica-un-camino-inevitable-lleno-de-retos/>

Becerra L. (2022). Transición energética: la energía es indispensable para el desarrollo sostenible. <https://www.acgqp.org/transicion-energetica-la-energia-es-indispensable-para-el-desarrollo-sostenible/>

Cáceres L., Guío D., Rincón S. (2016). Potencial energético teórico y técnico de la biomasa residual disponible en Colombia para el aprovechamiento en procesos de transformación termoquímica.

https://www.researchgate.net/publication/327232550_Potencial_energetico_teorico_y_tecnico_de_biomasa_residual_disponible_en_Colombia_para_el_aprovechamiento_en_procesos_de_trasformacion_termoquimica

Corredor, G. (2018). Colombia y la transición energética. *Ciencia Política*, 13(25), 107-125.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/cienciapol/article/view/70257/66268>

CREE Centro Regional de Estudios de Energía. (2022). Estudio para la Hoja de Ruta de la Transición Energética Colombia 2050.

De Castro Villela, I. A., & Silveira, J. L. (2007). Ecological efficiency in thermoelectric power plants. *Applied thermal engineering*, 27(5-6), 840-847.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. (2022). Aprobado CONPES de transición energética que consolidará el proceso hacia un desarrollo y crecimiento económico sostenible. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/CONPES-de-Transicion-Energetica-que-consolidara-el-proceso-hacia-un-desarrollo-y-crecimiento-economico-sostenible-aprobado.aspx>

De la Rosa M. (2020). La transición energética del país, como estrategia de desarrollo sostenible frente al cambio climático. <https://medioambiente.uexternado.edu.co/la-transicion-energetica-del-pais-como-estrategia-de-desarrollo-sostenible-frente-al-cambio-climatico/>

DW. (2022). Colombia anuncia en la COP 27 su plan de “Transición Energética Justa”. <https://www.dw.com/es/colombia-anuncia-en-la-cop27-su-plan-de-transicion-energetica-justa/a-63697427>

Enel Green Power. (2022). Qué es la transición energética. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/transicion-energetica>.

Enel Green Power. (2023). Energías Renovables-Hidrógeno. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/hidrogeno>.

ENEL X Colombia. (2022). Así avanza la transición energética en Colombia. <https://www.enelx.com/co/es/historias/avances-transicion-energetica-en-colombia>

Escallón, S. D. T., Rodríguez, I. D. G., & Quintero, T. J. (2021). Transición energética en Colombia: No necesariamente una realidad que se sustenta en el cambio climático. *Verba luris*, 46(2), 105-128.

FEDESARROLLO. (2013). Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia.

FEDESARROLLO. (2022). Transición Energética en Colombia: Política, costos de la carbono-neutralidad acelerada y el papel del gas natural.

Flechas Mejía L., Arias Gaviria J., Rueda M., et. al. (2022). Eliminación gradual del carbón en la generación eléctrica en Colombia.

[García Orrego, S. \(2021\). Análisis espacial multicriterio para la ubicación de parques eólicos y granjas solares en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. PotencialER2](#)

Guerrero Hoyos, B. G., Vélez Macías, F. de J., y Morales Quintero, D. E. (2019). Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia). Ambiente y Desarrollo, 23(44).
<https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd23-44.eets>

Holt, T. (2022). The energy transition: Could Latin America be the next global energy powerhouse? Roland Berger. Retrieved November 12, 2022, from <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Latin-America-a-potential-global-energy-giant.html>

IDEAM (2016), Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero – Colombia.

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>

IEA (2021), Eliminación progresiva del carbón: situación actual y tres estudios de caso.

<https://www.iea.org/reports/phasing-out-unabated-coal-current-status-and-three-case-studies/executive-summary>

IEA (2022), *Renovables 2022*, IEA, París

<https://www.iea.org/reports/renewables-2022>, Licencia: CC BY 4.0

IEA (2023), Hydrogen fuels and technologies.

<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen>

IPSE. (2022). Caracterización Energética de las ZNI.

<https://www.larepublica.co/especiales/energias-limpias/asi-esta-la-hoja-de-ruta-local-del-hidrogeno-verde-y-el-estatus-de-los-proyectos-3475793>

<https://www.larepublica.co/analisis/sun-tae-park-3699318/corea-un-socio-estrategico-en-la-era-de-la-economia-de-hidrogeno-3699315>

IRENA. (2022). World Energy Transitions Outlook 2022. 1.5 °C Pathway

Lizarazo C., Martínez D. (2022), Metodología para determinar el potencial de reemplazo de combustible Diesel por Hidrógeno Verde en Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia.

Marzolf N. (2015). Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia.

[https://www.researchgate.net/profile/Natacha-](https://www.researchgate.net/profile/Natacha-Marzolf/publication/283328511_Emprendimiento_de_la_Energia_Geotermica_en_Colombia/links/5633d51208aeb786b7013c01/Emprendimiento-de-la-Energia-Geotermica-en-Colombia.pdf)

[Marzolf/publication/283328511_Emprendimiento_de_la_Energia_Geotermica_en_Colombia/links/5633d51208aeb786b7013c01/Emprendimiento-de-la-Energia-Geotermica-en-Colombia.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Natacha-Marzolf/publication/283328511_Emprendimiento_de_la_Energia_Geotermica_en_Colombia/links/5633d51208aeb786b7013c01/Emprendimiento-de-la-Energia-Geotermica-en-Colombia.pdf)

Ministerio de Minas y Energía. (2022). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia.

https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf

Ministerio de Minas y Energía. (2023_a). Central Termoguajira será la primera en transitar hacia generación eléctrica 100% descarbonizada.

<https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/central-termoguajira-ser%C3%A1-la-primer-en-transitar-hacia-generaci%C3%B3n-el%C3%A9ctrica-100-descarbonizada/>

Ministerio de Minas y Energía. (2023_b). Sala de prensa-Noticias-Convenio Colombia-Alemania.

<https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/colombia-y-alemania-firman-convenio-para-impulsar-industria-del-hidr%C3%B3geno/>

Muñoz C., Villamil B., Restrepo A., (2021). Estudio socio-técnico del uso de energías renovables como alternativas de iluminación en las comunidades de las zonas no interconectadas.

<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias>

NASA GISS DATA., (2020). Giss Surface Temperature Analysis (V4)

https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/

National Geographic (2019). El incierto futuro de la captura y almacenamiento de carbono.

<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2019/12/oceanos-albergan-grandes-cantidades-gases-efecto-invernadero>

ONU-Programa para el medio ambiente. (2023). ¿Es el gas natural el combustible de transición que el mundo necesita?

<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/es-el-gas-natural-el-combustible-de-transicion-que-el-mundo>

Osorio A. (2022). El potencial energético del mar
<http://www.propiedadpublica.com.co/las-energias-del-mar/>

PACHECO, N. TORRES, J. 2021. Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, Cundinamarca. Universidad Libre.
<https://doi.org/10.21789/22561498.1785>

Portafolio (2023). Una de cada 5 personas en el país está en pobreza energética.
<https://www.portafolio.co/energia/hay-9-6-millones-de-habitantes-en-pobreza-energetica-589086>

Proost, J. (2020). Critical assessment of the production scale required for fossil parity of green electrolytic hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(35), 17067-17075.

Rincón S. (2021). Uso energético sostenible de la biomasa
<http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Proyecto.xhtml?idProyecto=14217>

Rodríguez, A. (2021). *Incentivos para la promoción de la electrificación sostenible en la zona no interconectada de Colombia* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Romero, Á. E. F., & Martínez, J. L. S. (2017). El surgimiento de la economía del hidrógeno, el uso de las energías renovables y su aportación a la economía verde. *Administración Y Organizaciones*, 19(37), 73-92.

<https://ser-colombia.org/2021/noticias-del-sector/la-republica-demanda-de-energia-electrica-en-zonas-no-interconectadas-ha-incrementado-259/>

Shell-Colombia. (2022). ¿Cuál es el rol del gas natural en la transición energética?

<https://www.shell.com.co/energia-e-innovacion/gas-natural/gas-natural-y-transicion-energetica.html#gas>

SOLMIC. (2022). Panorama de los proyectos de energía solar en Colombia. <https://www.solmic.co/panorama-de-los-proyectos-de-energia-solar-en-colombia>

Torres, A. J., Diaz, A. E., XUE, G. d., & Llanos, J. A. (2020). Soluciones Solares Fotovoltaicas Híbridas Implementadas En Zonas No Interconectadas de Colombia. IPSE- Grupo de Investigación XUE.

Transforma. (2021). INFORME DE POLÍTICA: La transición energética en Colombia: análisis y recomendaciones para la eliminación gradual de la generación a partir del carbón. <https://drive.google.com/file/d/1hRw4SaSurgdP5L0Pm1ubuBORTEbcG7sU/view>

Universidad Distrital Francisco José de Caldas-Grupo de Investigación XUE-Semillero de Investigación BARION. (2020). El Carbón: fuente de energía de la región central.

UPME. (2015a). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia

UPME. (2015b). Plan Energético Nacional Colombia: Ideario energético 2050.

UPME. (2018). Documento metodológico de cálculo del índice de cobertura de energía eléctrica.

UPME. (2021). Balance energético colombiano, ¿Qué es?. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx>

UPME. (2023). Informe de registro de proyectos de generación de electricidad.

Vallecilla, C. C. (2022). Mecanismo de asignación para la prestación del servicio de generación de energía en las zonas no interconectadas (ZNI) con energías renovables

Velandia J. (2016). Propuesta de mapa de ruta para la incursión de la energía geotérmica en La canasta energética colombiana.

[VERGARA, F. 2020. Actualización del inventario de PCHs en Colombia en una herramienta computacional para visualización web. Universidad de La Salle](#)

Vogt, A. (2018). Una de cada cinco plantas eléctricas del mundo podría abandonarse para cumplir con los objetivos climáticos - Sostenibilidad. Blogs. Iadb. <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/una-de-cada-cinco-plantaselectricas-del-mundo-podria-abandonarse-para-cumplir-con-los-objetivosclimaticos/>

<https://www.weforum.org/reports/fostering-effective-energy-transition-2021/>

XM. (2022). Páginas - Capacidad Efectiva Neta por Combustible. Sinergix.

<https://sinergox.xm.com.co/oferta/Paginas/Capacidad/capefenetporcom.aspx>

<https://www.weforum.org/reports/fostering-effective-energy-transition-2023/>

WEC. (2022). Energy Trilemma Index

<https://www.worldenergy.org/transition-toolkit/world-energy-trilemma-index>

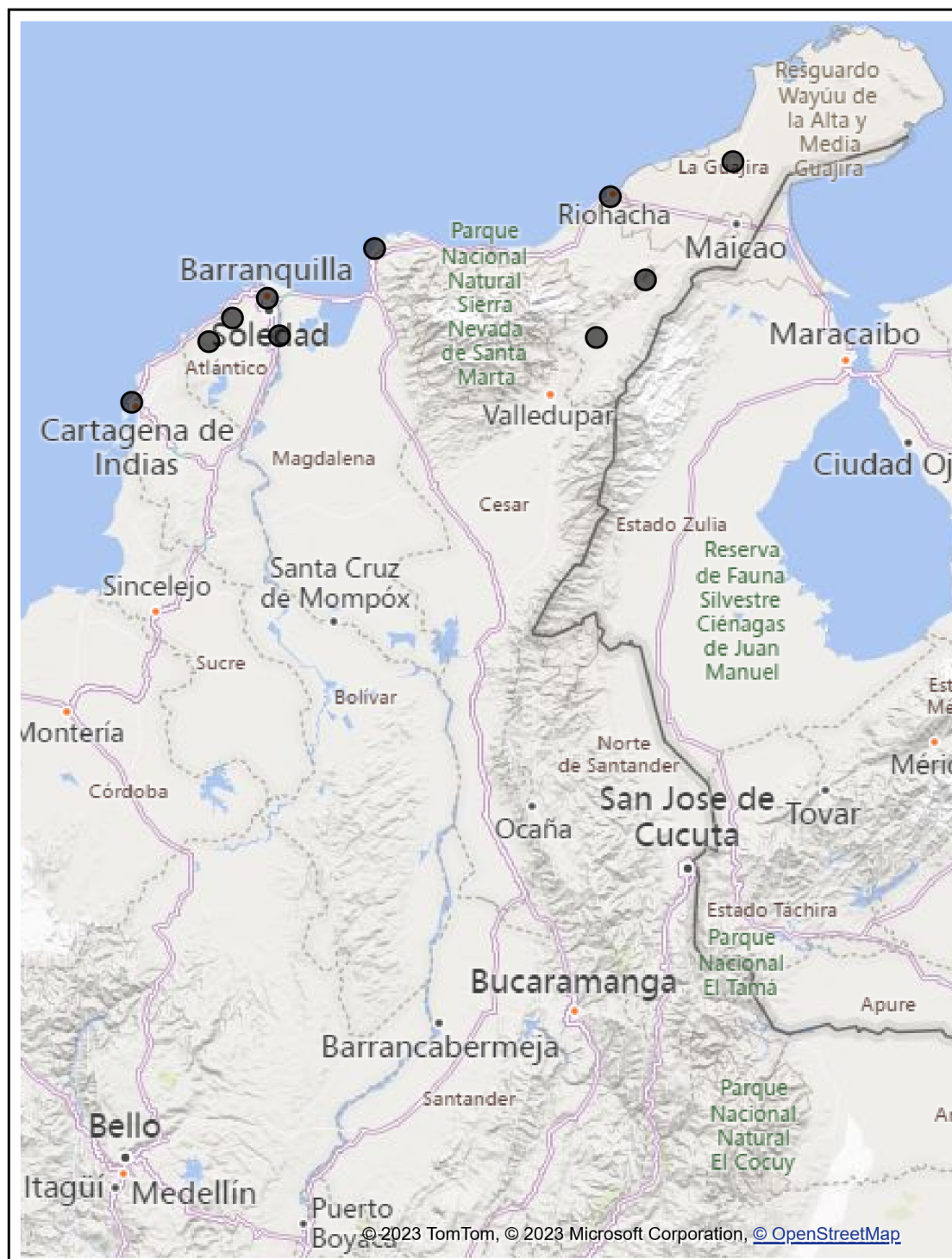
ANEXOS

Anexo 1. Ubicación proyectos de generación solar fotovoltaica



Fuente: (UPME., 2023)

Anexo 2. Ubicación proyectos de generación eólica



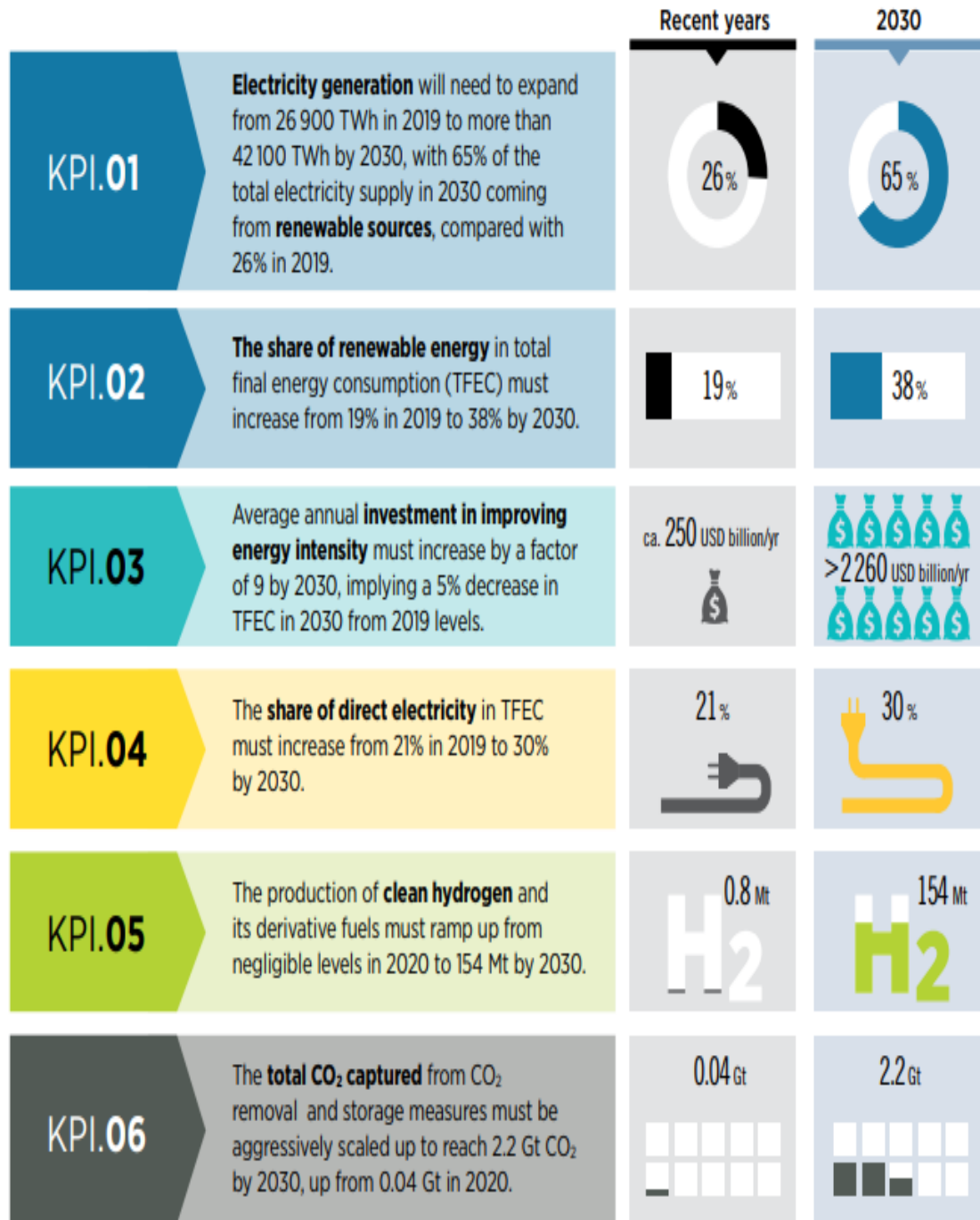
Fuente: (UPME., 2023)

Anexo 3. Localización de las ZNI



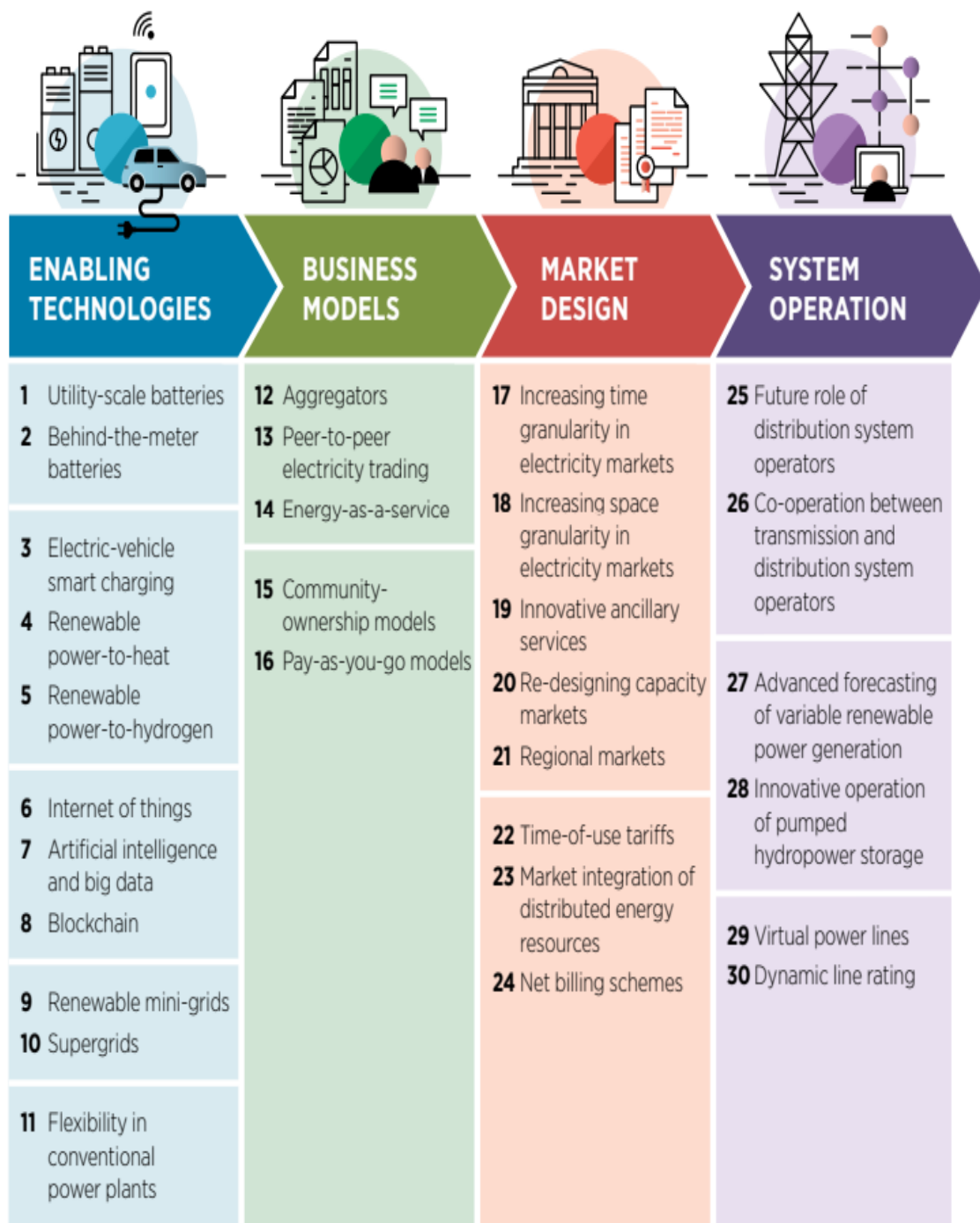
Fuente: (IPSE., 2022)

Anexo 4. Indicadores clave de desempeño para lograr el Escenario 1,5°C
en el año 2030



Fuente: (IRENA., 2022)

Anexo 5: El panorama de innovación de IRENA para la integración de energías renovables variables



Fuente: (IRENA., 2022)