



# ESTADO DEL ARTE Y SOCIALIZACIÓN PARA EL USO DEL CARBÓN EN LA GENERACIÓN TÉRMICA

JUNIO 2024

*Asociación Nacional de Empresas Generadoras, ANDEG*

*Elaborado por:*

*Catalina Rubio Morelli, Directora Ambiental & Sostenibilidad*

*Colaboración especial:*

*Andrea Belén, Directora Técnica y Regulatoria*

*Edwin Cruz Caballero, Vicepresidente*

*Diagramación y corrección de estilo:*

*Alante, Consultores en Reputación*

*Mayo, 2024*

# Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Contexto</b>  | <b>6</b>  |
| a. Estado actual del carbón térmico en Colombia                   | 7         |
| b. Participación del carbón en la generación de energía           | 9         |
| › Centrales de generación de energía eléctrica a base de carbón   | 9         |
| › Tecnologías de generación de energía eléctrica a base de carbón | 15        |
| c. Encadenamiento del carbón                                      | 23        |
| d. Proyección del uso del carbón                                  | 31        |
| <br>  |           |
| <b>2. Tecnologías para el uso eficiente del carbón</b>            | <b>32</b> |
| a. Beneficio del carbón   | 34        |
| b. High Efficiency Low Emissions                                  | 34        |
| c. Gasificación integrada de ciclo combinado (IGCC)               | 38        |
| d. CCUS   | 39        |
| e. Hidrógeno  | 47        |
| f. Biomasa  | 50        |
| g. Hibridación solar – Térmico                                    | 51        |
| h. Otros  | 52        |
| <br>  |           |
| <b>3. Políticas y financiamiento en Colombia</b>                  | <b>54</b> |
| <br>  |           |
| <b>4. Recomendaciones y mensajes finales</b>                      | <b>57</b> |
| <br>  |           |
| <b>Referencias</b>  | <b>59</b> |

## Lista de Tablas

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabla 1</b> Centrales de generación de energía termoeléctrica en Colombia a 2023, por tipo de combustible | <b>9</b>  |
| <b>Tabla 2</b> Combustibles de arranque por central de generación  | <b>13</b> |
| <b>Tabla 3</b> Procesos en la cadena de valor del carbón para generación de energía                          | <b>17</b> |
| <b>Tabla 4</b> Contaminantes criterio y sistemas de control  | <b>20</b> |
| <b>Tabla 5</b> Fuentes de emisión de GEI por cada alcance  | <b>22</b> |
| <b>Tabla 6</b> Municipios proveedores de carbón para generación eléctrica                                    | <b>24</b> |
| <b>Tabla 7</b> Factores de intensidad de CO <sub>2</sub> y valores de consumo de combustible                 | <b>37</b> |
| <b>Tabla 8</b> Proyectos de CCUS en operación a 2023, en el sector de energía o con uso de carbón            | <b>46</b> |

## Lista de Figuras

|                  |   |           |
|------------------|---|-----------|
| <b>Figura 1</b>  | Producción Mundial De Carbón, Y Principales Países Productores (Mt)   | <b>7</b>  |
| <b>Figura 2</b>  | Producción de carbón en Colombia 2012-2023  | <b>8</b>  |
| <b>Figura 3</b>  | Distribución producción carbón en Colombia  | <b>9</b>  |
| <b>Figura 4</b>  | Complementariedad tecnológica en el SIN   | <b>10</b> |
| <b>Figura 5</b>  | Generación Térmica en el SIN  | <b>11</b> |
| <b>Figura 6</b>  | Consumo de carbón térmico para generación de energía a 2024   | <b>12</b> |
| <b>Figura 7</b>  | Consumo histórico de Carbón térmico, plantas termoeléctricas en Colombia  | <b>12</b> |
| <b>Figura 8</b>  | Complementariedad Tecnológica en el Sistema Interconectado Nacional   | <b>14</b> |
| <b>Figura 9</b>  | Origen del carbón   | <b>16</b> |
| <b>Figura 10</b> | Emisiones de GEI - ANDEG Vs Inventario Nacional   | <b>23</b> |
| <b>Figura 11</b> | Caminos para una generación de energía más limpia a partir de carbón  | <b>33</b> |
| <b>Figura 12</b> | Estrategias clave para reducir las emisiones de las plantas de carbón existentes en el escenario de compromisos anunciados, 2022-2050   | <b>33</b> |
| <b>Figura 13</b> | La proporción de capacidad supercrítica y ultrasupercrítica en los principales países   | <b>35</b> |
| <b>Figura 14</b> | Tecnologías HELE  | <b>36</b> |
| <b>Figura 15</b> | Costos VALCOE proyectados para tecnologías de generación de energía térmica y renovable bajo supuestos de precios bajos, medios y altos | <b>37</b> |
| <b>Figura 16</b> | Generación de electricidad a partir de diferentes tecnologías de energía alimentadas con carbón   | <b>39</b> |
| <b>Figura 17</b> | Nivel de preparación tecnológica para la generación de energía  | <b>41</b> |
| <b>Figura 18</b> | Capacidad de captura operativa y planificada  | <b>42</b> |
| <b>Figura 19</b> | Capacidad de captura operativa y planificada por sector y por región  | <b>43</b> |
| <b>Figura 20</b> | LCOE de la electricidad de diferentes tecnologías al 2022   | <b>44</b> |
| <b>Figura 21</b> | Proceso completo Captura de CO <sub>2</sub> en Boundary Dam 3   | <b>47</b> |
| <b>Figura 22</b> | LCOH gris y azul a partir de gas natural y carbón   | <b>49</b> |
| <b>Figura 23</b> | Comparativa del LCOH según las rutas de producción  | <b>49</b> |



## 1. Contexto

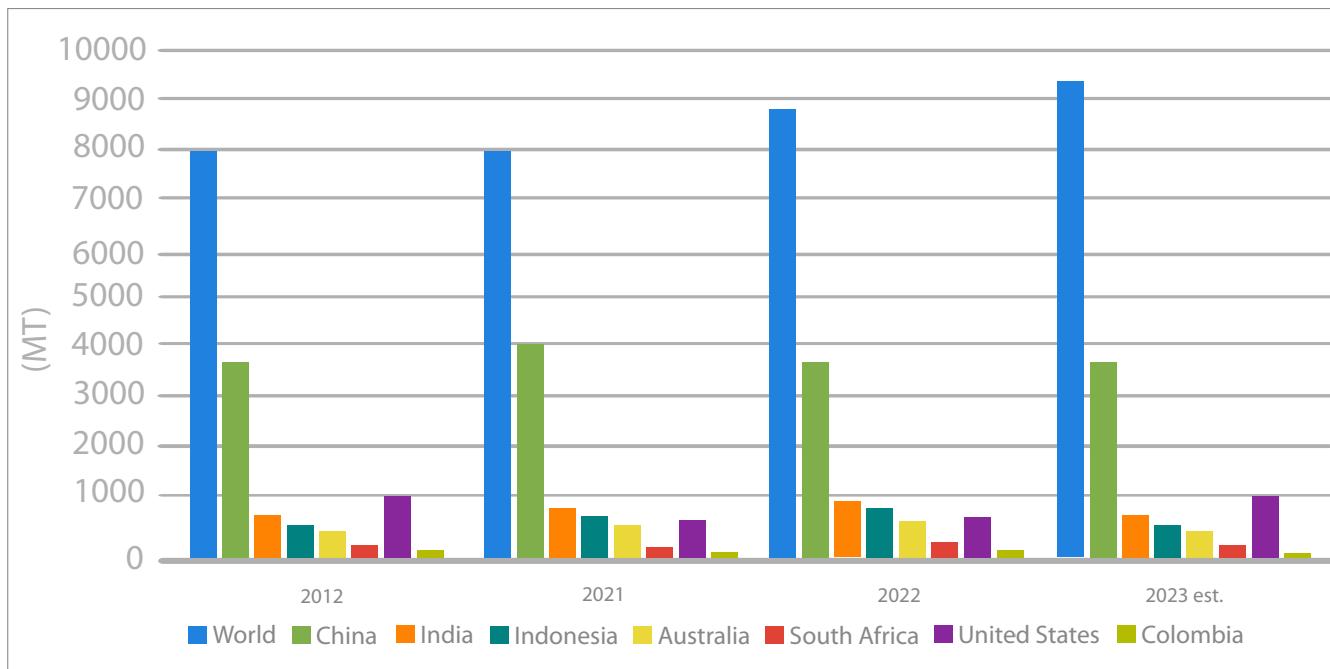
## a. Estado actual del carbón térmico en Colombia

Existen dos principales tipos de carbón en el país, el metalúrgico y el térmico. El carbón metalúrgico o coquizable es una roca sedimentaria negra que se encuentra en la corteza terrestre. Tiene un mayor contenido de carbono, suele tener poca humedad y es una parte esencial del proceso de fabricación del acero (BHP, 2024). Mientras que el carbón térmico tiene un alto poder calorífico y bajos contenidos de azufre, cenizas y humedad (mayor a la del carbón metalúrgico), el carbón colombiano es muy reconocido en el mundo por su excelente calidad, utilizándose principalmente en la generación de energía y procesos termoeléctricos (ACM, s.f.).

El carbón térmico ha representado más del 90% de la producción del país desde el 2012 y ha sido mayoritariamente exportado. El 8% de la producción es usada para el consumo interno colombiano y proviene principalmente de los departamentos del interior del país. Por otro lado, la gran mayoría de carbón metalúrgico es exportado directamente o transformado en coque y posteriormente exportado (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

A nivel internacional, durante el 2023 el mercado del carbón térmico estuvo dominado por el desempeño de Asia que sigue siendo de los principales productores y consumidores de esta materia prima para garantizar su demanda de energía. Por su parte, el principal impulsor del aumento en la demanda de carbón fue China, ya que sus importaciones en 2023 estuvieron cerca de duplicar los niveles de 2022 (Fenalcarbón, 2024).

**Figura 1 Producción mundial de carbón, y principales países productores (MT)**



**Fuente:** Tomado de (Fenalcarbón, 2024)

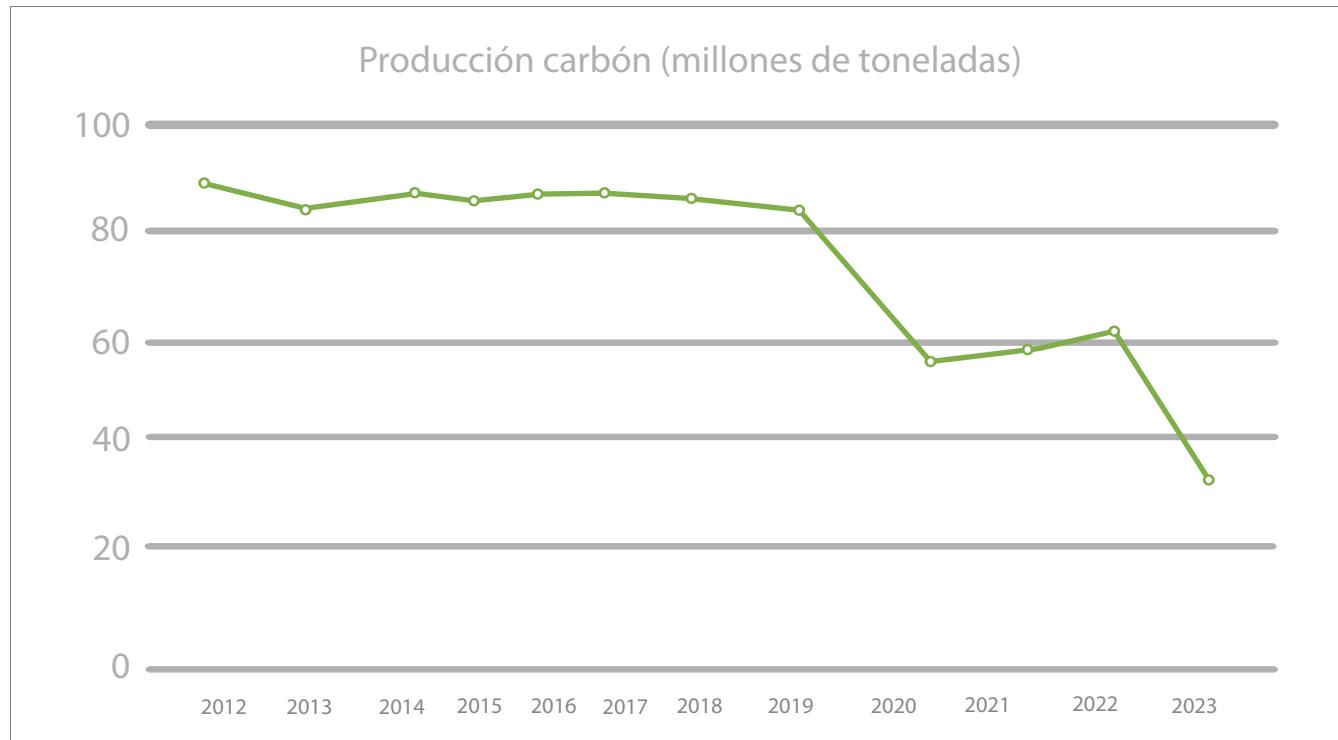
En Colombia el 16% de los títulos mineros corresponden a carbón. Este mineral aporta el 88% de las regalías del sector, contribuyendo al bienestar de las regiones y a la economía del país y representa aproximadamente el 80% de la participación del eslabón minero del PIB (Fenalcarbón & ANDEG, 2024).

Colombia es uno de los principales productores de carbón en el mundo y según el Servicio Geológico Colombiano y la Agencia Nacional de Minería, se caracteriza por ser reconocido a nivel mundial como un mineral de excelente calidad por los bajos contenidos de azufre, cenizas y humedad y alto poder calorífico que presenta en general.

El carbón térmico colombiano es el principal producto mineral de exportación a las regiones de Asia-Pacífico (Corea del Sur, China, Taiwán), Europa y la región Mediterránea (Polonia, Alemania, Países Bajos, España, Turquía, Grecia), con exportaciones significativas a las Américas y los países del norte de África y Oriente Medio (Fenalcarbón, 2024).

Entre 2012 y 2020, la producción anual de Colombia promedió 83,9 millones de toneladas, ubicándose como el principal productor de carbón en América Latina, el 11º a nivel mundial y el 5º mayor exportador de carbón del mundo (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

**Figura 2 Producción de carbón en Colombia 2012-2023**



**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de (John T. Boyd Company, 2023)

El país tiene 1.156 títulos mineros vigentes de este mineral, de los cuales menos del 3% corresponden a la minería de gran escala y a cielo abierto que está ubicada en la Guajira y Cesar, los cuales son responsables del 91% de la producción del país. Por su parte, la mediana y pequeña minería se realiza principalmente de manera subterránea en Antioquia, Boyacá, Córdoba, Cundinamarca, Norte de Santander y Santander (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Más de 80 municipios de Colombia derivan su economía de la actividad carbonífera, convirtiendo al carbón en un promotor para el desarrollo social y económico de los territorios del país (Fenalcarbón & ANDEG, 2024).

Así mismo, Colombia cuenta con importantes reservas de carbón, según los datos presentados por el Ministerio de Minas y Energía, el país cuenta con el 53% de las reservas probadas de carbón de Latinoamérica y el 0,6% de las reservas probadas mundiales de este mineral. Estas reservas posicionan al país como el undécimo en el mundo en reservas de carbón antracita y bituminoso. De acuerdo con la Agencia Nacional de Minería (ANM), Colombia cuenta con 1.586 millones de toneladas de reservas de carbón, que le permitirían mantener su producción por al menos 20 años (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

**Figura 3**  
*Distribución producción carbón en Colombia*



Fuente: Tomado de (John T. Boyd Company, 2023)

## b. Participación del carbón en la generación de energía

### **Centrales de generación de energía eléctrica a base de carbón**

Actualmente Colombia cuenta con 1.636 MW de capacidad instalada de generación de energía termoeléctrica que utilizan carbón como insumo para el proceso, representados en 5 empresas las cuales cuentan con 14 unidades de generación, dos de las cuales funcionan de manera dual con gas natural y carbón (Termoguajira 1 y 2).

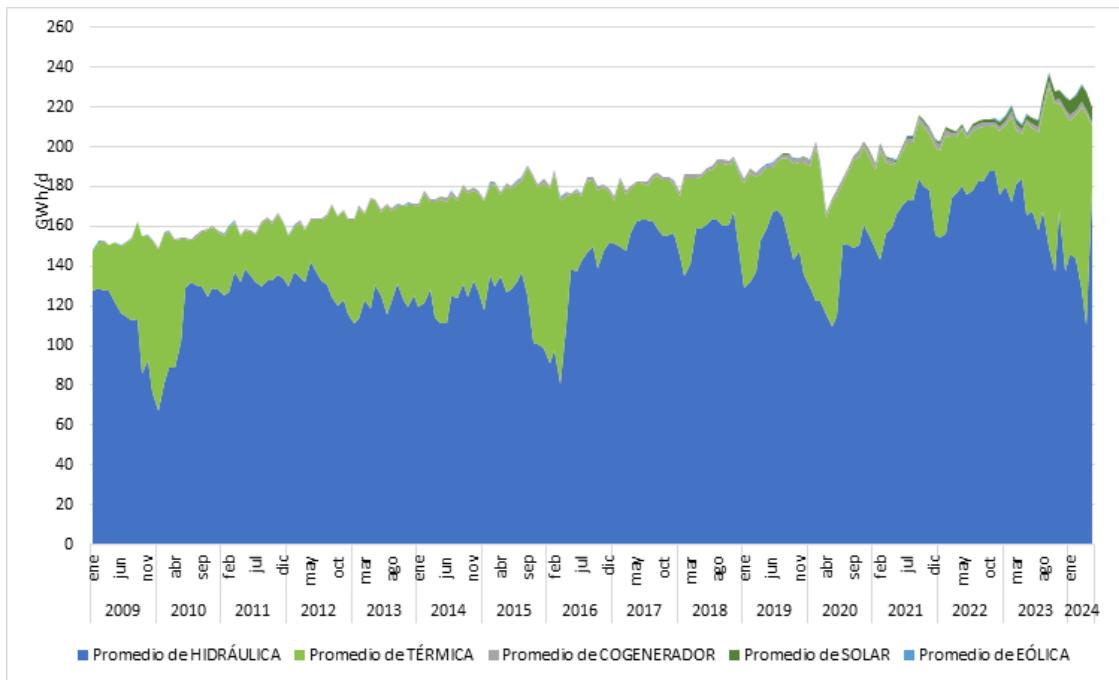
**Tabla 1 Centrales de generación de energía termoeléctrica en Colombia a 2023, por tipo de combustible**

| Tipo de combustible  | Central térmica                | Ubicación                  | Capacidad Total (MW) |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Gas Natural - Carbón | TermoGuajira (I, II) – Gecelca | Mingueo, Guajira           | 290                  |
| Carbón               | Gecelca 3                      | Puerto Libertador, Córdoba | 164                  |
|                      | Gecelca 3.2                    | Puerto Libertador, Córdoba | 273                  |

| Tipo de combustible | Central térmica            | Ubicación                      | Capacidad Total (MW) |
|---------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Carbón              | TermoTasajero I            | San Cayetano, Nte de Santander | 165                  |
|                     | TermoTasajero II           | San Cayetano, Nte de Santander | 170                  |
|                     | TermoPaipa I – Gensa       | Paipa, Boyacá                  | 36                   |
|                     | TermoPaipa II – Gensa      | Paipa, Boyacá                  | 72                   |
|                     | TermoPaipa III – Gensa     | Paipa, Boyacá                  | 70                   |
|                     | Eléctrica Sochagota        | Paipa, Boyacá                  | 160                  |
|                     | TermoZipa (I, II, III, IV) | Tocancipa, Cundinamarca        | 236                  |
| <b>TOTAL</b>        |                            |                                | <b>1.636</b>         |

Las centrales termoeléctricas a carbón aportan a la complementariedad tecnológica del Sistema Interconectado Nacional, aportando firmeza y confiabilidad, en especial en periodos de hidrología crítica, como lo son los períodos de Fenómeno de El Niño.

**Figura 4 Complementariedad tecnológica en el SIN**

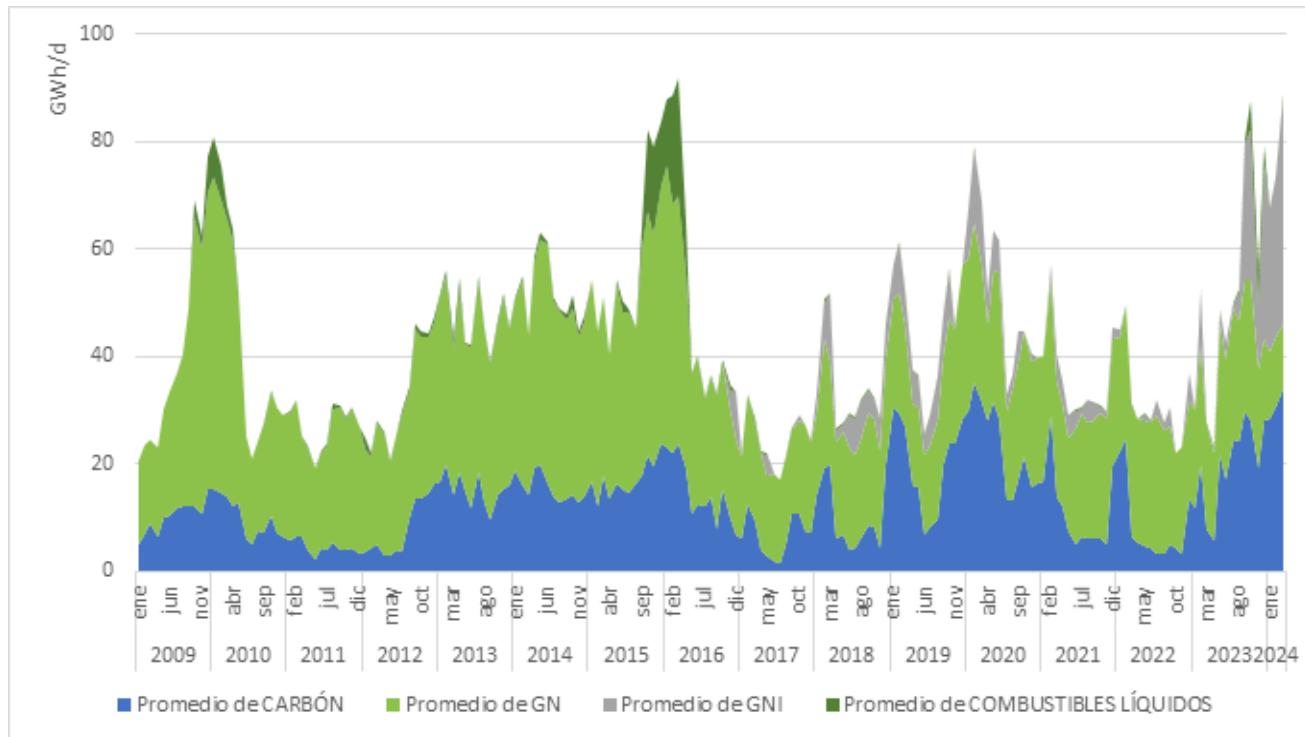


**Fuente: Elaboración propia**

También, existen diferentes empresas que utilizan carbón, como parte de su proceso de cogeneración.

Durante el 2024, se ha tenido una generación en promedio diaria de 31GWh-día, que representa cerca del 15% de la demanda diaria del SIN. Así mismo, se ha tenido un consumo mensual promedio de 420.000 toneladas de carbón.

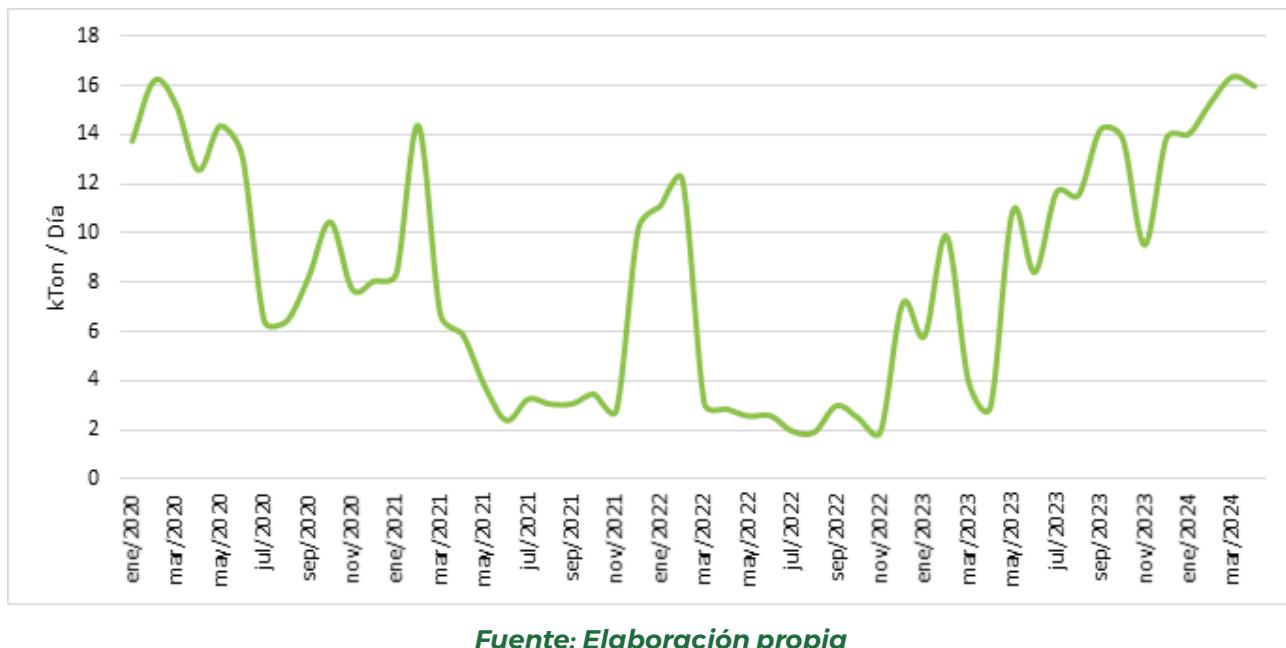
**Figura 5 Generación Térmica en el SIN**



**Fuente: Elaboración propia**

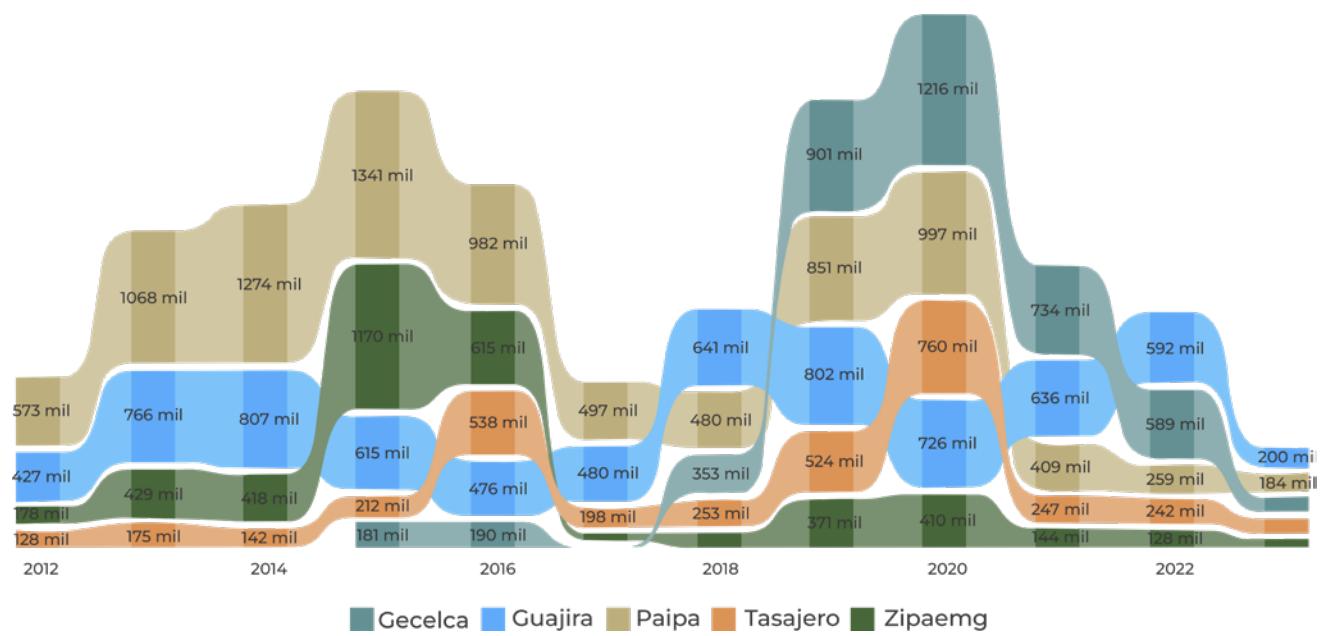
Para el proceso de generación de energía en Colombia, el consumo de carbón en los últimos años por parte de las térmicas se muestra en las siguientes figuras:

**Figura 6 Consumo de carbón térmico para generación de energía a 2024**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7 Consumo histórico de Carbón térmico, plantas termoeléctricas en Colombia**



Fuente: Tomado de (John T. Boyd Company, 2023)

Además, para el proceso de arranque, estas centrales utilizan diferentes combustibles complementarios:

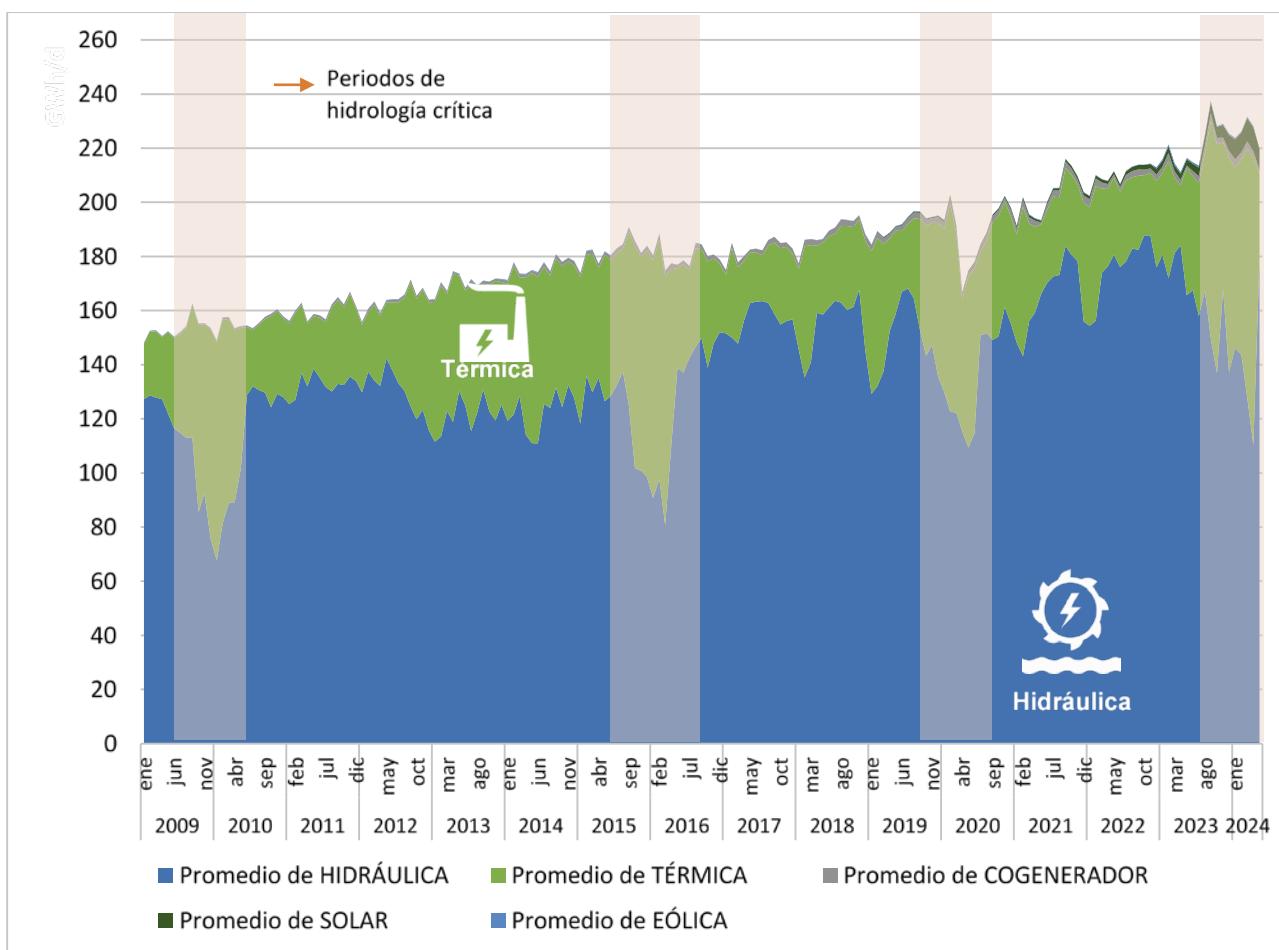
**Tabla 2 Combustibles de arranque por central de generación**

| Tipo de combustible de arranque | Central   |
|---------------------------------|---|
| Gas Licuado de Petróleo - GLP   | Gensa (Termopaipa I, II, III)   |
| Gas Natural                     | Termoguajira (1 y 2)  |
| Fuel Oil                        | Compañía Eléctrica de Sochagota (Termopaipa IV)<br>Termozipa<br>Termotasajero |
| ACPM/ Diésel                    | Gecelca<br>Termozipa<br>Termotasajero   |

➤ ***Importancia del carbón en la generación de energía frente a fenómenos climáticos extremos***

Para un país como Colombia, el carbón juega un papel fundamental en la generación de energía durante eventos climáticos extremos, caso del Fenómeno de El Niño, periodo de hidrología crítica, en donde el nivel de los embalses del país disminuye significativamente y, por ende, la generación hidroeléctrica también, como se muestra en la siguiente figura. Así, el carbón funge como soporte del Sistema.

**Figura 8 Complementariedad Tecnológica en el Sistema Interconectado Nacional**



**Fuente: elaboración propia a partir de datos de XM**

El periodo 2023-2024 presentó un intenso Fenómeno de El Niño, en donde alcanzó niveles máximos de generación térmica llegando a aportar el 56% de la atención de la demanda. En el caso del carbón representó 5.70 GWh.día a 32.63 GWh-día. Para el 2024 el promedio de consumo de carbón para generación de energía es de 470.000 toneladas al mes.

Así el carbón, brinda confiabilidad, disponibilidad y firmeza en la generación de energía, soporta el sistema eléctrico ante condiciones de hidrología crítica como el Fenómeno de El Niño. Además, al igual que toda la generación térmica es respaldo para la transición energética justa, segura y gradual y para la penetración masiva de fuentes no convencionales de energía renovable.

En Colombia, el carbón es pieza fundamental en la formación de precios en el mercado eléctrico mayorista y funge como techo para la regulación de ofertas de otras tecnologías y a su vez es señal de referencia para el mercado de contratos de mediano y corto plazo de energía eléctrica.

#### ➤ **Tecnologías de generación de energía eléctrica a base de carbón**

El carbón es conocido como uno de los combustibles fósiles y su origen está asociado a procesos geológicos y está compuesto principalmente por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, se origina en transformaciones físicas y químicas de grandes acumulaciones vegetales, depositadas en ambientes palustres (pantanos), lagunares o deltaicos (UPME, s.f.)

#### **Tipos de carbón**

##### **Existen diferentes tipos de carbón:**

- **Antracita:** también conocido como carbón duro, con alto contenido de carbono (entre el 86% y el 98%), bajo contenido de materia volátil y poder calorífico superior a 14.000 BTU/lb. Es utilizado como combustible en generación de calor o vapor en la industria térmica y siderúrgica, entre otras.
- **Bituminoso:** tipo de carbón que posee un menor contenido de carbono y menor poder calorífico que los carbones antracíticos. Por su forma de uso se conocen como i) carbones coquizables, usados en procesos de obtención del acero, y ii) carbones térmicos, usados para la producción de vapor para generación de energía.
- **Sub bituminoso:** cuenta con menor poder calorífico que los carbones bituminosos, su composición en carbono (35% a 45%), con elevado contenido de material volátil y algunos con poder coquizable. También es utilizado para la generación de energía eléctrica y en procesos industriales.
- **Lignito y turba:** son carbones con alta humedad y alto contenido de ceniza y de material volátil, por lo cual posee un bajo poder calorífico. Es normalmente empleado para la generación de calor (calefacción), en algunos procesos industriales que requieren generar vapor, entre otros.

**Figura 9 Origen del carbón**



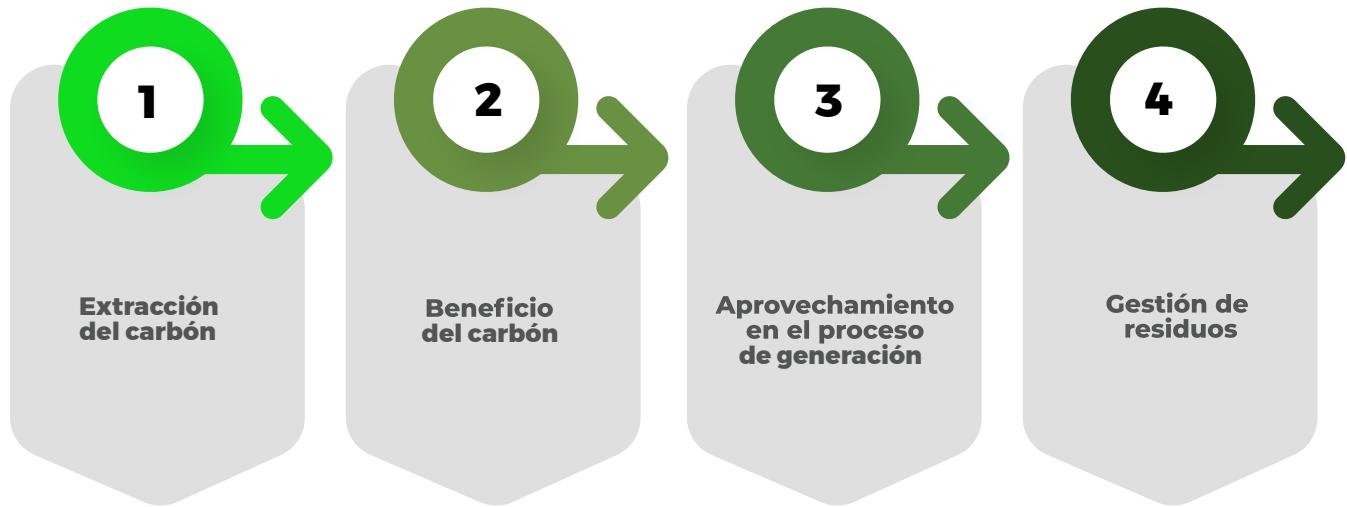
Fuente: (AreaCiencias, 2024)

Las centrales de generación de energía eléctrica en Colombia, utilizan principalmente dos tipos de carbón, dependiendo de la ubicación de las plantas:

- Carbón Bituminoso: En las regiones de Cundinamarca, Boyacá, Santander, Norte de Santander y Córdoba.
- Carbón Sub-bituminoso: En la región de la Guajira.

### Tecnologías de generación

La generación de energía basado en el carbón, tiene en cuenta dentro de su cadena de valor cuatro procesos principales, cómo se indica a continuación:



Dentro de estos procesos se pueden encontrar diferentes tipos de métodos, tecnologías y actividades.

**Tabla 3 Procesos en la cadena de valor del carbón para generación de energía**

| Extracción del carbón  | Beneficio del carbón   | Aprovechamiento  | Gestión de Residuos  |
|--|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>› Subterráneo</li> <li>› Cielo abierto</li> <li>› Aprovechamiento del metano</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Separación</li> <li>› Selección/Clasificación</li> <li>› Trituración/ Quebramiento</li> <li>› Tamizado</li> <li>› Lavado</li> <li>› Secado</li> <li>› Mezcla de carbones</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Subcrítico</li> <li>› Supercrítico</li> <li>› Ultra supercrítico</li> <li>› Ultra supercrítico mejorado</li> <li>› Calderas</li> <li>› Lecho Fluidizado</li> <li>› Ciclo combinado</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Control de Emisiones atmosféricas</li> <li>› Cenizas</li> </ul> |

*Fuente: Elaboración propia*

Las centrales térmicas operan bajo diferentes procesos termodinámicos y de combustión. En Colombia, para el caso de las termoeléctricas que utilizan carbón, el principal ciclo termodinámico corresponde al ciclo Rankine y los procesos de combustión pueden ser por carbón pulverizado en calderas subcríticas o por lecho fluidizado.

## **Ciclo Rankine:**

El ciclo Rankine es un ciclo de potencia representativo del proceso termodinámico que tiene lugar en una central térmica de vapor. Utiliza un fluido de trabajo, normalmente agua, que alternativamente evapora y condensa. Mediante la quema de un combustible, en este caso carbón, el vapor de agua es producido en una caldera a alta presión para luego ser llevado a una turbina donde se expande para generar trabajo mecánico en su eje unido al de un generador, el cual generará la electricidad en la central térmica. El vapor de baja presión que sale de la turbina se introduce en un condensador, en donde se condensa y cambia al estado líquido (habitualmente el calor es evacuado mediante una corriente de refrigeración procedente del mar, de un río o de un lago). Posteriormente, una bomba se encarga de aumentar la presión del fluido en fase líquida para volver a introducirlo nuevamente en la caldera, cerrando de esta manera el ciclo (Universidad de Guanajuato, 2021).

## **Carbón Pulverizado en calderas subcríticas:**

Las centrales térmicas a carbón se clasifican como subcríticas en función de la presión (13-18 MPa) y la temperatura (<5400 °C) del vapor de salida de la caldera y se desarrollan en un rango de potencias brutas de hasta 450 megavatios para carbón pulverizado, y en el caso de tecnologías de lecho fluido es de 600 megavatios. Estas centrales presentan rendimientos entre un 35 y 40% y son las más abundantes dado su facilidad para operar de acuerdo a las presiones y temperaturas a las que están sometidos los equipos (Pérez, 2014). Con el uso de la tecnología de carbón pulverizado convencional, el carbón se tritura y luego se pulveriza, para impulsarlo posteriormente con aire a presión a través de un ducto que lo distribuye a los diferentes quemadores de la caldera. Los principales tipos de quemadores utilizados en estas calderas son de fuego frontal y tangencial (UPME, 1998). Esta tecnología se ha actualizado para incorporar los sistemas de control de emisiones.

## **Calderas de Lecho fluidizado Circulante**

Dentro de las tecnologías de calderas de lecho fluidizado se encuentran las circulantes a presión atmosférica, las burbujeantes a presión atmosférica y de ciclo combinado con lecho fluidizado a presión. En Colombia existe solo una central con la tecnología de lecho fluidizado circulante.

La tecnología de combustión en lecho fluidizado pretende trasladar los principios de fluidización y transferencia de calor que se dan en los reactores homogéneos a la combustión de combustible y consiste en el comportamiento de un sólido fino (carbón), que se mueve por la acción de un gas o líquido, el cual las suspende o arrastra. El funcionamiento general de la caldera LFC es la combustión del combustible articulado con el aire previamente calentado, el cual está en un lecho incombustible, el arrastre genera un flujo de gas ascendente hacia la caldera y mediante el ciclón se retorna material particulado al lecho, mientras el gas sale de la caldera en un sistema de recuperación de calor (García, 2020)

Para el caso nacional, esta tecnología permite tomar un recurso natural como el carbón no exportable del departamento de Córdoba, incentivando el desarrollo sostenible y formal de la industria minera. Las calderas de lecho fluidizado presentan como ventaja la reducción de emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) (Gecelca, 2022).

### **Ciclo combinado con gas natural y carbón pulverizado:**

Una planta de ciclo combinado con gas natural y carbón pulverizado consta de un generador eléctrico, una caldera de recuperación de calor asistida por quemadores a carbón que genera vapor, el cual es aprovechado por un turbo-generador de vapor, con los equipos convencionales de un ciclo térmico Rankine (UPME, 1998).

### **Parámetros de control de calidad del carbón:**

Las centrales termoeléctricas que utilizan carbón, realizan un control al mineral que ingresa a las instalaciones, verificando parámetros de calidad, para garantizar una operación óptima y eficiente. Dentro de los parámetros que se evalúan se encuentran:

- **Capacidad calorífica:** representa la energía de combustión del carbono e hidrógeno y del azufre. Es el parámetro más importante en la definición de los contratos de compraventa de carbones térmicos y en la clasificación de los carbones por rango
- **% azufre:** presencia de azufre en el carbón térmico.
- **% de ceniza:** son sales inorgánicas contenidas en el carbón. Es un indicador del porcentaje de residuos que se genera producto de la combustión del carbón. La ceniza incluye una variedad de subproductos que provienen de la quema de carbón como las cenizas volantes, cenizas de fondo, escoria de caldera y material de desulfuración de gases.
- **Humedad total:** se presenta como humedad total, inherente o de equilibrio, superficial, agua de hidratación o agua de descomposición. Tiene importancia en contratos de compraventa, en evaluación y control de procesos industriales y en manejo y pulverización.
- **Materias volátiles:** corresponden a los componentes del carbón, excepto el agua, que se libera a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. La materia volátil es una cuestión de seguridad y salud, ya que los carbones con un alto nivel de materias volátiles presentan un mayor riesgo de combustión espontánea.
- **Índice de hinchamiento:** es un indicador del comportamiento del carbón cuando se calienta y hace referencia a las características de carbonización y de producción de especies intermedias como el coque. Mediante la prueba de índice de hinchamiento, se establecen características aglomerantes de los carbones estudiados, que están asociadas con las propiedades plásticas.

- › **Hardgrove Grindability Index - HGI:** es el índice de molienda, método aplicado al carbón y utilizado para determinar la facilidad con la que el carbón puede ser pulverizado. El HGI refleja la dureza, tenacidad y fractura del carbón.
- › **Carbono: fijo:** es el carbono elemental, C, presente en el carbón. Representa la parte no volátil del carbón que permanece después de la determinación de materia volátil y que se quemará luego en forma sólida después de que esa materia volátil ha sido liberada.
- › **Temperatura.**

### **Sistemas de control de emisiones atmosféricas**

**Tabla 4 Contaminantes criterio y sistemas de control**

| <b>Contaminante criterio</b> | <b>Sistema de control</b>  |
|------------------------------|--|
| óxidos de Nitrógeno          | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Quemadores Bajo NOx</li> <li>› Quemadores de alta eficiencia</li> <li>› Sistema de caldera de lecho fluidizado</li> </ul> |
| óxidos de azufre             | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Inyección de caliza</li> <li>› Desulfurizador</li> </ul>  |
| Material particulado         | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Precipitador electrostático</li> <li>› Filtros de manga</li> <li>› Barreras físicas y naturales</li> </ul>                |

### **Gestión de Cenizas**

Uno de los subproductos del uso del carbón en el proceso de generación de energía eléctrica corresponde a las cenizas resultantes de la combustión del mineral. Estas cenizas se pueden clasificar en:

- › **Cenizas Volátiles:** polvo fino con partículas principalmente cristalinas con o sin materiales de co-combustión compuestas por dióxido de silicio y óxidos de aluminio. Estas cenizas se obtienen por la precipitación mecánica o electrostática del polvo en suspensión contenido en los gases procedentes de la combustión (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2011).
- › **Cenizas de fondo:** o escoria corresponden a partículas más gruesas que caen al fondo por gravedad y suelen ser extraídas hasta los silos de almacenamiento temporal (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2011).

Las cenizas se gestionan comúnmente de dos formas, la primera, se disponen en un patio de cenizas, diseñado y dispuesto para almacenar el material estéril y la segunda mediante la entrega del material volante a empresas cementeras que utilizan el residuo de la generación de energía como aditivo para la producción de cemento.

### **Eficiencia Energética**

Las centrales de generación de energía, realizan grandes inversiones en programas de eficiencia energética, orientados a optimizar el desempeño energético de las centrales tanto a nivel de planta (operativo) como a nivel administrativo.

A nivel operativo las acciones han estado orientadas a:

- › Mejoramiento de los procesos de combustión
- › Mantenimiento de sistemas de deshollinado de calderas
- › Control operacional
- › Reducción de in quemados, consumo de combustible y energía auxiliar
- › Inspección y mantenimiento a registros de aire secundario, pulverizadores y quemadores de carbón
- › Reducción de temperatura de salida de gases de caldera
- › Reducción de pérdidas de energía térmica (vapor) en válvulas
- › Mejoras en aislamiento térmico de calderas
- › Sustitución de combustibles de arranque (líquidos por GLP)
- › Recambio de equipos y partes
- › Mantenimientos preventivos

A nivel administrativo las estrategias se centran en:

- › Recambio de luminarias por iluminación LED
- › Implementación de sistemas de refrigeración (aires acondicionados más eficientes)
- › Campañas de ahorro de energía

Así mismo, algunas de las empresas han avanzado en la implementación de programas de eficiencia energética como la ISO 50001 y cuentan con planes de inversión para los próximos años para optimizar la operación de las centrales, realizando los mantenimientos y recambios tecnológicos para contar con la última tecnología disponible de acuerdo a la configuración de la central.

En los últimos años estas acciones han representado inversiones por más de \$6.500 millones (ANDEC, 2023).

### **Emisiones de Gases de Efecto Invernadero**

Las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero para las centrales de generación de energía que utilizan carbón corresponden a:

**Tabla 5 Fuentes de emisión de GEI por cada alcance**

| Alcance 1   | Alcance 2   | Alcance 3  |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ Combustión de combustibles fósiles en fuentes fijas para el proceso de generación de energía (Carbón, GLP, líquidos, gas)</li> <li>➢ Combustibles fuente móviles propias</li> <li>➢ Plantas de tratamiento de aguas</li> <li>➢ Actividad de extracción de carbón (mina Las Palmeras)</li> <li>➢ Extintores</li> <li>➢ Refrigerantes</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ Consumo de electricidad de la red del SIN</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ Transporte y abastecimiento de combustibles</li> <li>➢ Transporte aéreo y terrestre de colaboradores</li> <li>➢ Usuarios de la energía</li> <li>➢ Empresas de transmisión, distribución y comercialización de la energía</li> </ul> |

**Fuente: (ANDEC, 2023)**

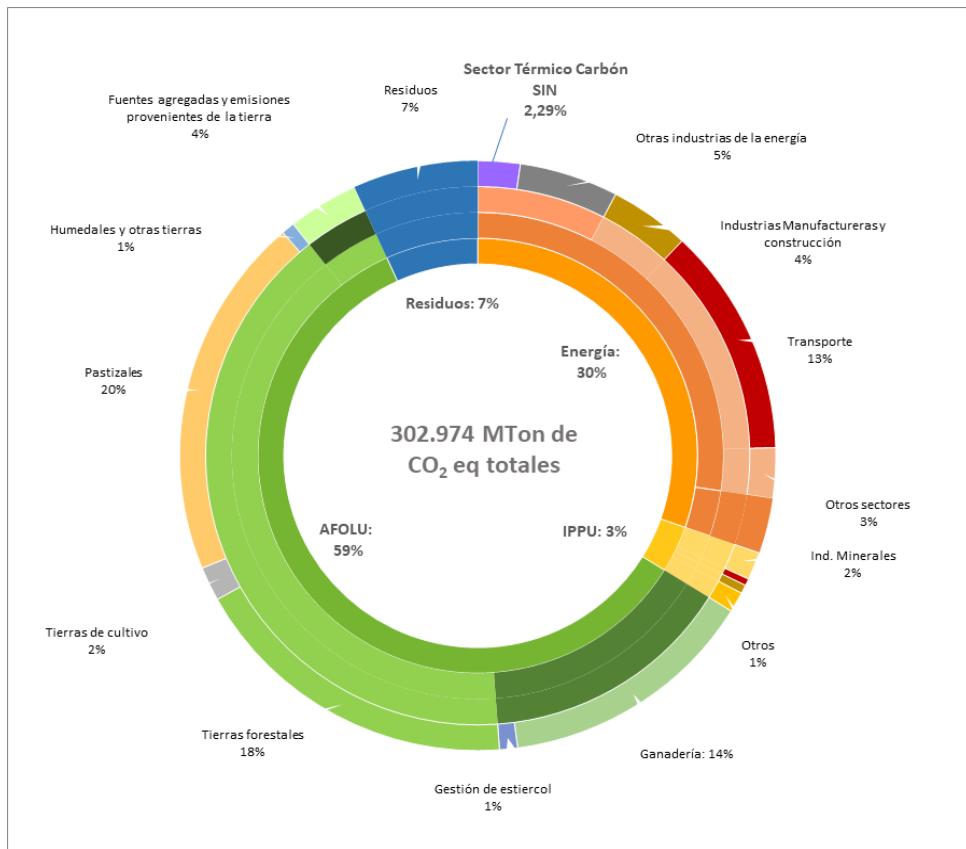
Las emisiones del proceso de generación de energía (combustión de combustibles fósiles gas, carbón, líquidos) contenidos en el Alcance 1 de todo el sector térmico representa el 4.4% de las emisiones del país<sup>1</sup> (aprox. 13.3 millones de TonCO<sub>2</sub>), de estas emisiones, el 2.3% corresponde a las empresas que utilizan carbón para el proceso de generación de energía (aprox. 6.9 millones de TonCO<sub>2</sub>)<sup>2</sup>

Si bien es un porcentaje marginal respecto al inventario nacional, las empresas están evaluando diferentes alternativas de mitigación a ser incluidas en los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático empresarial - PICCCe, en línea con la transición energética justa, las estrategias de carbono neutralidad y en articulación con el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del Sector Minero Energético - PICCCme 2050, implementando principalmente estrategias de eficiencia energética, innovación y actualización tecnológica y la articulación con iniciativas regionales y territoriales y el mercado de carbono, entre otras.

<sup>1</sup> Dato tomado a partir del Tercer Reporte Bienal de Actualización del Colombia ante la CMNUCC (año 2023 de emisiones de ANDEC respecto al dato de emisiones de CO<sub>2</sub>e del último año presentado en el inventario nacional-2018).

<sup>2</sup> Las emisiones de las empresas que utilizan carbón hacen parte de las emisiones de ANDEC y a su vez estas hacen parte de las emisiones del sector termoeléctrico.

**Figura 10 Emisiones de GEI - Carbón SIN Vs inventario Nacional**



**Fuente:** (ANDEC, 2023)

Los compromisos de Colombia en materia de gestión del cambio climático establecen dos principales metas, la primera en el cumplimiento de la Contribución Nacionalmente Determinada – NDC, donde se espera que al 2030, se alcance una reducción del 51% respecto al escenario tendencial BAU y la segunda, con la que se espera que el país alcance la carbono neutralidad en el año 2050.

### c. Encadenamiento del carbón

#### Proveedores

La generación de energía termoeléctrica a carbón cuenta con un encadenamiento productivo asociado a la extracción del mineral, que para el caso colombiano proviene de pequeña y mediana minería subterránea y de superficie.

<sup>1</sup>Dato tomado a partir del Tercer Reporte Bienal de Actualización del Colombia ante la CMNUCC (año 2023 de emisiones de ANDEC respecto al dato de emisiones de CO<sub>2</sub>e del último año presentado en el inventario nacional-2018).

<sup>2</sup>Las emisiones de las empresas que utilizan carbón hacen parte de las emisiones de ANDEC y a su vez estas hacen parte de las emisiones del sector termoeléctrico.

El carbón proviene de municipios de Boyacá, Cundinamarca, Córdoba, Norte de Santander, Santander, que incluyen, entre otros:

**Tabla 6 Municipios proveedores de carbón para generación eléctrica**

| Boyacá   | Norte de Santander                               | Córdoba           | Cundinamarca   | Guajira                 |
|--|--|-------------------|--|-------------------------|
| Corrales, Tasco, Gámeza, Paipa, Tópaga, Cucaita, Iza, Socha, Sogamoso, Mongua, Sativa Sur, Tuta, Socotá, Motavita, Umbita, Beteitiva, Paz de Rio, Chivata, Monguí, Aquitania, Sotaquirá, Duitama | El Zulia, Salazar, Sardinata, Bochalema y Cúcuta | Puerto Libertador | Cogua, Cucunubá, Guachetá, Lenguazaque, Sutatausa, Tausa y Zipaquirá | Hatonuevo, Los Campanos |

*Fuente: Empresas Afiliadas a ANDEG*

Las centrales de generación evalúan que todos los proveedores cuenten con título minero y que se encuentren al día con sus obligaciones en materia ambiental.

#### **Proyectos sociales, ambientales y acompañamiento técnico**

En el marco de la transición energética y reconociendo la importancia de los insumos mineros (carbón) en la economía nacional y para la generación de energía, las empresas afiliadas a ANDEG le apuestan a una cadena de valor cada vez más responsable y sostenible, abarcando aspectos sociales, ambientales y económicos del entorno y de la operación.

Así, la cadena de valor social es fundamental ya que a través de esto se fomenta la consolidación de una actividad minera digna, responsable y segura, contribuyendo al fortalecimiento de un eslabón fundamental de la economía regional y nacional.

Las empresas afiliadas a ANDEG, desarrollan proyectos sociales, ambientales y de acompañamiento técnico en conjunto con sus proveedores y en sus áreas de influencia.

- **Dignificación de la labor minera:** Esta iniciativa busca la formalización y tecnificación estructural de la minería, promueve la fidelización de los proveedores y el desarrollo e implementación de buenas prácticas sociales, ambientales y técnicas en la extracción del carbón. Así mismo fomenta la formación técnica y complementaria para la población minera, procesos de acompañamiento socio-familiar y la implementación de simuladores mineros que garanticen prácticas seguras.
- **Programa de Asistencia Técnica PATI:** Programa de asistencia técnica integral que ofrece a los proveedores de carbón, que tienen suscrito contrato, acompañamiento continuo, asesoría, apoyo y asistencia en aspectos ambientales, mineros, SG\_SST, legal y socioeconómico.

- **Técnico:** Acciones de mejoramiento y asesoría profesional, gestión y cumplimiento de requerimientos, planificación y organización, capacitaciones.
- **Salud y seguridad:** Fortalecimiento de los sistemas de gestión en salud y seguridad ocupacional, capacitaciones y promoción de condiciones seguras para prevenir accidentes y enfermedades, educación en seguridad vial, formación para gestión cero accidentes en las minas.
- **Ambiental:** promover el desarrollo de buenas prácticas, Mejoramiento de procesos de gestión ambiental y de los recursos naturales, programas de reforestación, asesoramiento frente a requerimientos, permisos y trámites de las autoridades ambientales (incluidos los PMA e ICA).
- **Socio-económico:** Prevención de vulneración de derechos humanos, verificación de contratos laborales, bienestar del trabajador, capacitaciones temáticas sociales, mantenimiento de vías de acceso, acompañamiento a los centros educativos del área de influencia, capacitaciones a los trabajadores sobre responsabilidad social individual y colectiva, alcoholismo y sustancias psicoactivas.
- **Legal - laboral:** Buenas prácticas labores, organizacionales y contables, pago de prestaciones de ley, impuestos y regalías, tecnificación del título minero, cumplimiento legal, promoción de las cajas de compensación familiar, adulto mayor y vivienda.

➤ **Otros programas sociales:** Además, desde el sector de generación a carbón, se desarrollan otro tipo de programas sociales que impactan de manera positiva los territorios en donde operan y su área de influencia y que están orientados a:

- Garantizar el acceso a la educación y mejorar las condiciones de los centros educativos y capacidades docentes
- Apoyar el acceso a formación técnica y profesional
- Fomentar espacios de recreación, deporte y salud
- Participación y apoyo comunitario, incluyendo el mejoramiento y mantenimiento de vías, capacitación en conducción segura, el fortalecimiento organizacional de las comunidades y apoyo a proyectos comunitarios

➤ **Programas ambientales:** Desde las empresas de generación de energía se cuenta con una apuesta decidida por la preservación del medio ambiente y se adelantan diferentes estrategias entre las cuales se destaca:

- Acciones dirigidas al uso responsable del recurso hídrico preservando condiciones de calidad y cantidad
- Gestión de la calidad del aire a través de barreras vivas
- Reforestación de áreas mineras con material vegetal nativo
- Actividades de reforestación para la protección de cuerpos hídricos, reservorios y mejora del aspecto paisajístico en zonas de escasa presencia arbórea en las áreas de influencia y en las inmediaciones de las centrales de generación de energía

- Reforestación y mantenimiento de especies vegetales en las áreas de disposición de cenizas
- Estrategias de repoblación y reintroducción de las especies faunísticas.
- Promoción de esquemas como el Pago por Servicios Ambientales y entrega de plántulas a las comunidades



## EXPERIENCIA SIGNIFICATIVA:

- La estrategia ambiental comunitaria de Termotasajero está enfocada hacia la protección del bosque seco tropical y contempla:
- Estrategia de educación ambiental dirigida para adultos con el premio Comunidad Ambientalmente responsable el cual se basó en las necesidades de las 5 veredas del área de influencia directa y de cómo ellos entienden el ecosistema Bosque seco tropical en el que habitan.
- Talleres de reconocimiento de las bondades del bosque seco y establecimiento de huertas comunitarias o individuales, familiarizándose con técnicas de manejo agroecológico.
- En alianza con Corponor se desarrolló el programa escolar Gestores Ambientales Un tesoro Llamado Pozo Azul, logrando la participación del 100% de los niños grados 3-5 de los dos colegios presentes en San Cayetano.
- Mediante el acuerdo con más bosques y Corponor lograron apadrinar 10 familias ubicadas dentro y en la zona de amortiguación del Distrito Regional de Manejo Integrado Bosque Seco Pozo Azul, bajo la modalidad de pago por servicios ambientales logrando la propagación y siembra de 3.604 y la recuperación de 360 árboles nativos del bosque seco tropical.





## EXPERIENCIAS DESTACADAS:



- › Jornadas de recuperación paisajística y recuperación de suelos en territorios de unidades productivas mineras.
- › Acompañamiento para el mejoramiento de buenas prácticas ambientales.
- › Entrega de 10.560 árboles a las comunidades del área de influencia de CES con la finalidad que las comunidades se interesen y realicen actividades de reforestación para la protección de cuerpos hídricos.



### GUARDIANAS DEL BUCHÓN - GENSA

Se vinculó a Asomujeca, Asociación conformada por madres cabeza de hogar del área de 60 influencia de Termopaipa, quienes se encargan del proceso de control, extracción, cargue, transporte y disposición final del buchón de agua. Como parte de este proceso, realizan un tratamiento que permite obtener como resultado final un ayudante orgánico para suelo que es utilizado en el vivero que existe en Termopaipa. A través de este proyecto se logra el empoderamiento de la mujer rural a través de la creación del negocio inclusivo. Se han extraído 52 hectáreas de buchón de agua que se encontraban afectando las piscinas de enfriamiento de la empresa y el tramo del río Chicamocha.

### **Resaltando la cadena de valor del carbón**

Considerando la importancia de la cadena de valor del carbón, desde ANDEG se gestan alianzas estratégicas que permiten abordar los temas relacionados buscando generar conocimiento y una gestión que permita hacer un uso más responsable y sostenible del mineral.

**Fenalcarbón:** Alianza estratégica orientada a procurar una gestión intergremial para el fortalecimiento, consolidación y trazabilidad de cadena de valor del carbón térmico en Colombia, promoviendo como insumo fundamental que brinda complementariedad y confiabilidad a la matriz de generación eléctrica del país.

**Servicio Geológico Colombiano:** Convenios de cooperación suscritos entre ambas entidades para aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para contribuir a:

**1. Proyecto de Investigación** “Carbones y Materiales Energéticos” en donde se efectuó un muestreo de carbones en minas, análisis de laboratorio mediante diferentes técnicas analíticas modernas (químicas, fisicoquímicas y petrográficas) para obtener una caracterización fisicoquímica de estas zonas y se realizó el procesamiento estadístico y geoestadístico de información geoquímica, así como en pila y banda en las termoeléctricas y cenizas producidas en la combustión con el fin de tener un modelo de comportamiento del mercurio durante el proceso de combustión.

Como resultado, se analizó el contenido de mercurio en las muestras de carbón tomadas en frentes de mina y, además, se realizó un análisis de correlación del contenido de mercurio con otros elementos como el azufre. Esta correlación se evaluó a través del coeficiente de Pearson, como una medida de dependencia lineal entre las dos variables que son: el contenido de mercurio y contenido de azufre. Obteniendo como principales resultados (ANDEG & SGC, 2022):

- En la zona estudiada de Boyacá, el contenido de mercurio en base seca en las muestras de carbón tomadas en frente de mina, se encuentra en concentraciones desde 8 $\mu\text{g}/\text{kg}$  a 486  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , En otras zonas donde se ha analizado el mercurio puede llegar a 900  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . El valor medio del contenido de mercurio en base seca en las muestras analizadas es de 127  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .
- En la zona estudiada de Norte de Santander, el contenido de mercurio en base seca en las muestras de carbón tomadas en frente de mina se encuentra en concentraciones desde 3  $\mu\text{g}/\text{kg}$  a 721  $\mu\text{g}/\text{kg}$  y en promedio es 114  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .
- En la zona estudiada de Córdoba, el contenido de mercurio en base seca en las muestras de carbón tomadas en frente de mina, se encuentra en concentraciones desde 6 $\mu\text{g}/\text{kg}$  a 116  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , siendo los valores más altos correspondientes a las muestras de carbón que presentan los mayores porcentajes de azufre total. El promedio es 58  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .
- Para los tres sectores estudiados, los valores más altos de contenido de mercurio corresponden a las muestras de carbón que presentan los mayores porcentajes de azufre total y para todos los casos esta concentración de mercurio resulta menor al promedio mundial de 170  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .
- Respecto de los procesos de combustión, aunque pueden liberarse pequeñas cantidades de mercurio durante las tareas de almacenamiento y manejo del carbón, parte del mercurio se emite por las chimeneas de combustión una vez se quema. Las calderas funcionan a temperaturas superiores a los 1100°C, y el mercurio contenido en el carbón se evapora y se libera como gas. Parte del gas de mercurio liberado puede enfriarse y condensarse al pasar por la caldera y por el dispositivo de control de la contaminación del aire. La fracción de mercurio que no se emite a la atmósfera durante la combustión queda atrapada en los subproductos como las cenizas de fondo y las cenizas volantes recuperables.

**2. Proyecto de Investigación** “Aprovechamiento de carbones y subproductos”, en el marco del cual se realizó la caracterización del contenido de elementos químicos de tierras raras, incluyendo elementos mayores, menores y trazas, presentes en el carbón en bandas de alimentación de las calderas y de las cenizas en las salidas de los sistemas de recolección de cenizas de fondo y volantes y en los patios de ceniza de dos de las empresas afiliadas a ANDEG en Boyacá y Córdoba. Esta iniciativa busca generar el conocimiento como insumo para aportar al desarrollo de modelos ambientalmente sostenibles que sirvan de estándar para el aprovechamiento eficiente del recurso y la visualización de oportunidades en el contexto de la transición energética.

### ***Generación de empleo y recursos para las regiones***

De acuerdo a las cifras sectoriales, presentadas por el Ministerio de Minas y Energía, el sector del carbón genera alrededor de 130 mil empleos de los cuales el 75% corresponde a mediana y pequeña minería de los cuales se estiman que 35 mil empleos corresponden a empleos directos y más de 100 mil empleos indirectos (Agencia Nacional de Minería, 2024) Por su parte el sector de generación de energía termoeléctrica a base de carbón afiliado a ANDEG genera 1280 empleos directos de los cuales el 24% son mujeres, y más de 470 empleos indirectos (ANDEG, 2023).

Además del empleo, el sector de generación de energía contribuye de manera significativa con el aporte de recursos económicos para los territorios a través de las transferencias del sector eléctrico en el marco de la obligación establecida por la Ley 99 de 1993. Estos recursos corresponden para el caso de las generadoras termoeléctricas a la distribución del 4% de las ventas brutas de energía por generación propia, que se distribuye de la siguiente manera:

- 2.5% para la Corporación Autónoma Regional y que debe ser destinado para la protección del medio ambiente en las cuencas y ecosistemas del área donde está ubicada la planta.
- 1.5% para el municipio donde está situada la planta y destinado para obras previstas en el Plan de Desarrollo Municipal, con prioridad para proyectos de saneamiento básico y mejoramiento ambiental.

Para el caso de las afiliadas a ANDEG que generan con carbón, la contribución para el año 2023 correspondió a más de \$37.772.000.000, destinados a Paipa (Boyacá), Dibulla (Guajira), Puerto Libertador (Córdoba), San Cayetano (Norte de Santander) y las corporaciones autónomas regionales Corpoboyaca, CVS, Corpoguajira y Corponor.

La minería de carbón en Colombia ha contribuido de manera relevante al PIB. Entre 2016 y 2019, la minería de carbón tuvo una participación promedio del 1,1% en el PIB del país, con producciones promedio anuales de 8,8 billones de pesos. Además, la industria de la minería de carbón contribuye a los ingresos del Estado, principalmente por dos mecanismos: las regalías y los impuestos que pagan las empresas, en donde los aportes de la minería a los ingresos del Estado ascendieron a \$3 billones de pesos en el 2019, equivalente al 1,2% del total de ingresos del Estado. En cuanto a las regalías, entre 2017 y 2019 las contribuciones de la minería del carbón correspondieron en promedio a cerca de

2 billones de pesos anuales, equivalente al 88% de las regalías del sector minero (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

#### **d. Proyección del uso del carbón**

Las proyecciones en la extracción y uso del carbón en el mediano y largo plazo varían dependiendo de las decisiones que los países tomen sobre sus fuentes de energía. Las tendencias pueden estar principalmente marcadas por los cambios que puedan presentarse en la economía de China e India, mayores consumidores mundiales de carbón, la evolución de combustibles sustitutos, como el gas, la adopción de tecnologías de uso de energías renovables, como las fuentes eólicas y solares, y el grado de avance en los compromisos ambientales adoptados por diversos países (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Para el 2026, la IEA visualiza una tendencia emergente de disminución de la demanda mundial de carbón, a partir de 2024. Dado que el crecimiento en India y la ASEAN compensa las caídas en la Unión Europea y los Estados Unidos, China sigue siendo el actor decisivo para establecer la tendencia de demanda mundial de carbón. Es probable que un crecimiento de las energías renovables mayor que el crecimiento general de la demanda de electricidad impulse el consumo mundial de carbón en una trayectoria descendente. Esto implicaría que es probable que el carbón haya alcanzado su punto máximo en 2023. Hasta 2026, se espera que el comercio mundial de carbón disminuya alrededor de un 12%, impulsado por la creciente producción nacional en economías con uso intensivo de carbón, como China e India, y los planes de eliminación gradual del carbón en otros lugares, como Europa. Si bien se espera que las exportaciones de carbón térmico disminuyan aproximadamente un 16% para 2026, se espera que las exportaciones de carbón metalúrgico aumenten ligeramente, casi un 2%. (IEA, 2023).

La generación mundial a partir de carbón alcanzó un máximo histórico en 2022, lo que llevó las emisiones de CO<sub>2</sub> de las centrales eléctricas a niveles récord y representó más de un tercio de la generación total de electricidad. Los altos precios del gas natural provocados por la invasión rusa de Ucrania, junto con fenómenos climáticos extremos, llevaron a muchas regiones a recurrir al carbón para asegurar el suministro de electricidad. Si bien es probable que el reciente repunte de la generación a carbón sea un problema temporal en algunas regiones, la tendencia general no va por buen camino con el Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050, que exige reducciones inmediatas y una disminución global de la generación a carbón, una generación de alrededor del 55% para 2030 en comparación con los niveles de 2022, y una eliminación completa para 2040 (IEA, 2023).

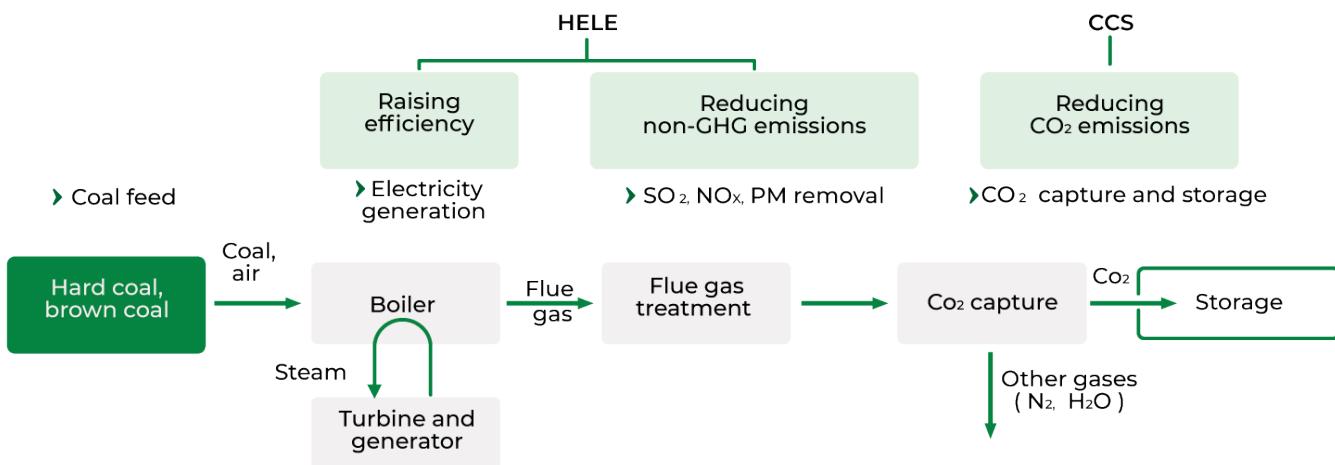
En Colombia, se estiman unos recursos y reservas de 16.569 millones de toneladas, siendo el 84% correspondiente a carbón térmico.



## 2. Tecnologías para el uso eficiente del carbón

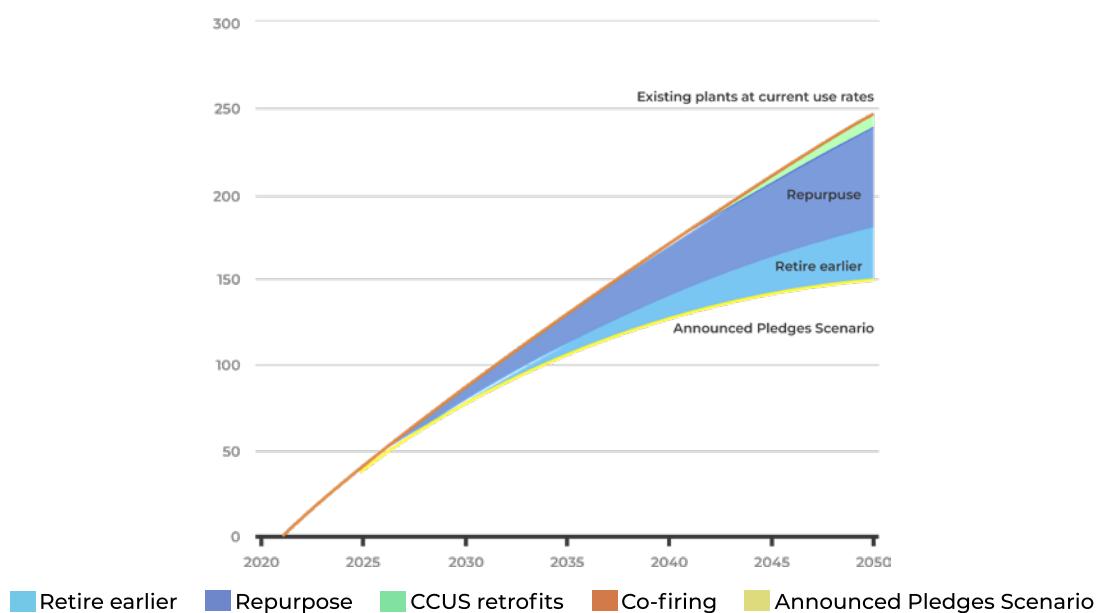
El uso eficiente del carbón para la generación de energía representa un esfuerzo en el desarrollo de tecnologías y prácticas que permitan aumentar la eficiencia del proceso y sobre todo reducir las emisiones de dióxido de carbono. Para esto, la Agencia Internacional de Energía presenta tres principales alternativas tecnológicas: i) Implementar y seguir desarrollando tecnologías HELE, ii) Implementar CCS y; iii) Cambiar a combustibles con bajas emisiones de carbono o a combustibles no fósiles como medio para reducir la generación a partir del carbón.

**Figura 11 Caminos para una generación de energía más limpia a partir de carbón**



Fuente: (IEA, 2022)

**Figura 12 Estrategias clave para reducir las emisiones de las plantas de carbón existentes en el escenario de compromisos anunciados, 2022-2050**



Fuente: (IEA, 2022)

A continuación, se presentan estas y otras alternativas tecnológicas y prácticas para el uso eficiente del carbón para la generación de energía.

### **a. Beneficio del carbón**

El beneficio del carbón es una alternativa para asegurar que el mineral utilizado en los procesos de combustión cuente con mejores características, haciendo el proceso más eficiente y con un mejor resultado en términos ambientales (emisiones atmosféricas).

El beneficio del carbón consiste principalmente en acciones mecánicas mediante las cuales se prepara el mineral mediante técnicas de separación, clasificación, trituración, tamizado, lavado y secado para remover impurezas, aumentar su calidad y su eficiencia.

Además, se pueden realizar mezclas de carbonos provenientes de diferentes proveedores para homogenizar la calidad de los diferentes carbonos utilizados para obtener una quema (combustión) de un mineral de mejor calidad.

### **b. High Efficiency Low Emissions**

Las tecnologías de alta eficiencia y bajas emisiones (HELE por sus siglas en inglés) representan una alternativa para las centrales térmicas existentes y para las nuevas plantas de generación de energía con carbón, especialmente las de calderas supercríticas (SC) y ultra supercríticas (USC).

Se pueden encontrar instalaciones HELE en 23 países de Europa, Asia, Estados Unidos y Australia. En todo el mundo, hay 49.000 MW de instalaciones HELE ultrasupercríticas (USC), de los cuales 379.000 MW están en funcionamiento y 110.000 MW en construcción. Las plantas de energía supercrítica (SC) tienen actualmente 541.000 MW en funcionamiento y 32.000 MW adicionales en construcción (Future Coal, 2024).

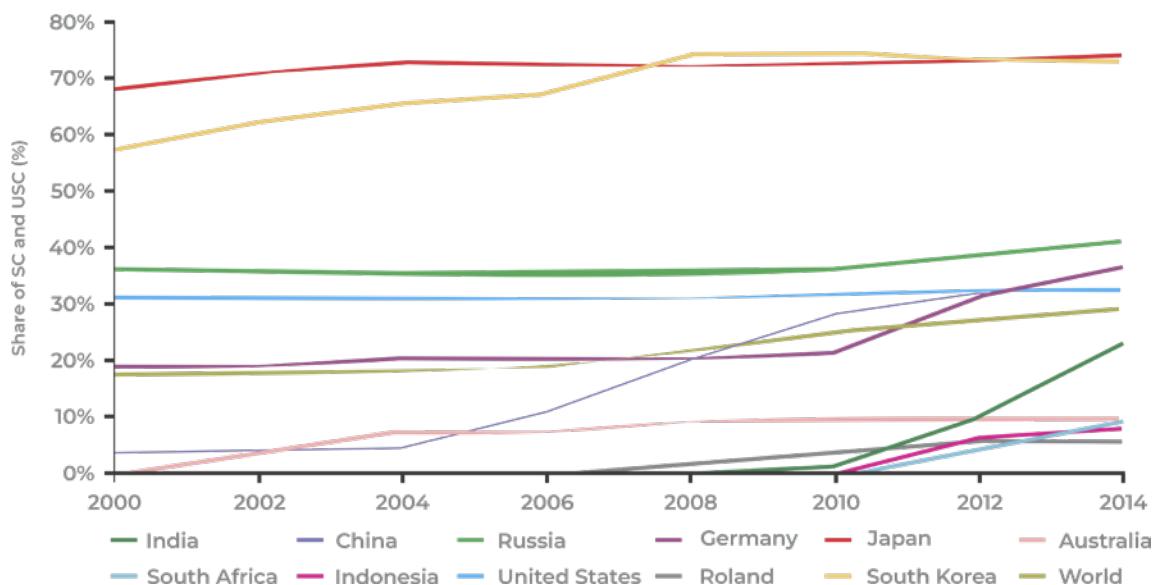
La combustión de carbón pulverizado en calderas USC es actualmente la tecnología HELE más eficiente, en donde las unidades de generación pueden alcanzar una eficiencia del 47.5% (LHV, neto) (Future Coal, 2024), reduciendo emisiones promedio globales. Las unidades HELE emiten entre un 25% y un 33% menos de carbono que las promedio para el parque eléctrico existente a nivel mundial y hasta un 40% menos que las tecnologías más antiguas (World Coal Association, 2021).

Cada punto porcentual ganado al aumentar la eficiencia puede reducir el CO<sub>2</sub> en 2 puntos porcentuales. Combinado con equipos de control de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas, USC puede entregar más energía con un impacto ambiental mucho menor (Future Coal, 2024).

Aunque los costos de capital iniciales de unidades HELE son mayores, se requiere menos carbón por unidad de electricidad producidos, proporcionando importantes ahorros en costos operativos durante la vida del activo (World Coal Association, 2021).

Según el estudio conjunto entre Future Coal y el Centro para la Energía de la ASEAN, se determinó que si se utilizara una inversión de 26 mil millones de dólares para mejorar las plantas de energía de carbón subcrítico existentes con tecnología ultrasupercrítica, se reducirían las emisiones anuales en 60 millones de tCO<sub>2</sub>, el equivalente a retirar 31,5 millones de automóviles al año. Mientras que si se asignara una inversión de 26.000 millones de dólares a la energía eólica marina, solo se desplazarían 7 GW de capacidad de carbón subcrítico, lo que reduciría las emisiones anuales en 35,8 millones de tCO<sub>2</sub>, el equivalente a retirar 19 millones de automóviles al año (Future Coal, 2024).

**Figura 13 La proporción de capacidad supercrítica y ultrasupercrítica en los principales países**



Fuente: (IEA, 2012)

➤ **Calderas supercríticas:** El vapor se genera a una presión superior al punto crítico del agua, por lo que no se requiere separación agua-vapor (excepto durante el arranque y parada). En este tipo de calderas no se forman burbujas, e inmediatamente convierten el agua en vapor. Las calderas suelen trabajar a temperatura de 538 – 565°C y presiones por encima de 3,200 psi. Estos sistemas no tienen tambores y el flujo del fluido, que casi siempre es agua, es inducida por bomba de alimentación, lo que permite que el sistema funcione a variaciones de presión (Tecnigrado, 2022).

Las plantas supercríticas suelen alcanzar eficiencias del 42% al 43%. Según la Agencia Internacional de Energía, los mayores costos de capital de la tecnología supercrítica se deben en gran parte a las aleaciones utilizadas y las técnicas de soldadura requeridas para operar a presiones y temperaturas del vapor más altas. Los mayores costos pueden compensarse parcial o totalmente con el ahorro de combustible (dependiendo del precio del combustible).

➤ **Calderas ultrasupercríticas:** similar a la generación supercrítica, pero funciona a temperaturas y presiones aún más altas. Las eficiencias térmicas pueden alcanzar el 45%. Algunos fabricantes se refieren a las plantas que funcionan a una temperatura del vapor superior a 600°C como USC (esto varía según fabricante y región). Las actuales plantas USC de última generación funcionan a temperaturas de hasta 620 °C, con presiones de vapor de 25 MPa a 29 MPa. El costo de las unidades ultrasupercríticas puede ser hasta un 10% mayor que el de las supercríticas.

Existen también, la tecnología avanzada ultrasupercrítica (A-USC). Usando los mismos principios básicos de la USC, el desarrollo de A-USC tiene como objetivo lograr eficiencias superiores al 50%, que requiere materiales capaces de soportar condiciones de vapor de 700°C a 760°C y presiones de 30 MPa a 35 MPa. Los materiales que se están desarrollando son aleaciones no ferrosas basadas en níquel (denominadas superaleaciones), que cuestan mucho más que los materiales de acero utilizados en las plantas de SC y USC. Desarrollar superaleaciones y reducir su costo son los principales desafíos para la comercialización de la tecnología A-USC.

**Tabla 7 Factores de intensidad de CO<sub>2</sub> y valores de consumo de combustible.**

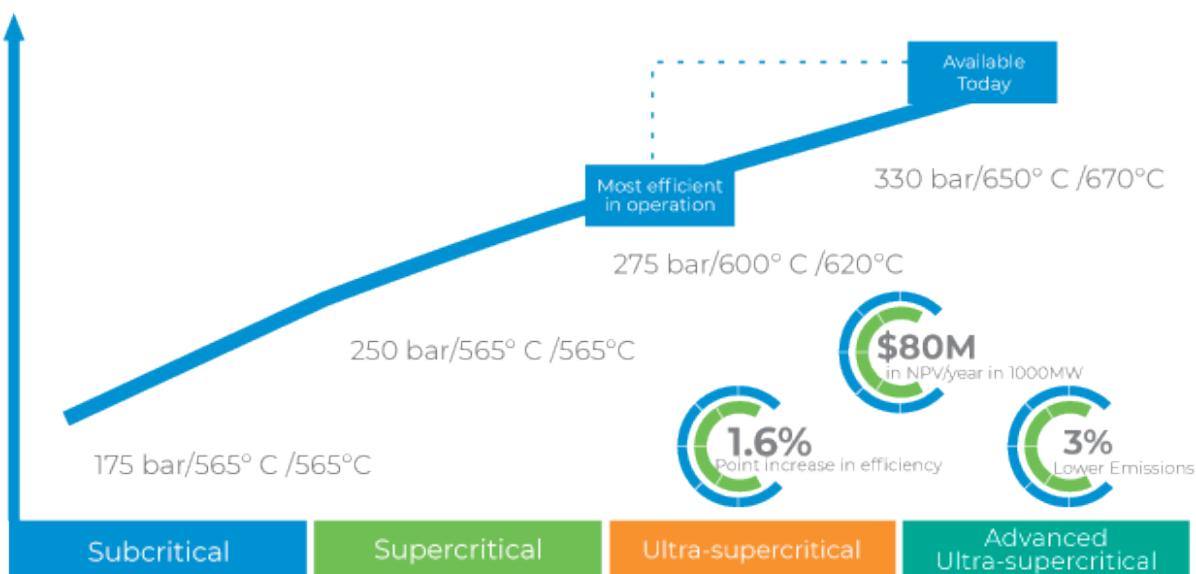
|                     | Factor de intensidad de CO <sub>2</sub> | Tasa de emisión<br>(Ton/MWh)** | Consumo de carbón* | Costo de capital |
|---------------------|---|--------------------------------|--------------------|------------------|
| A-USC - IGCC        | 670-740 g CO <sub>2</sub> /kWh          |                                | 290-320 g/kWh      |                  |
| Ultra-supercritical | 740-800 g CO <sub>2</sub> /kWh          | 0.83                           | 320-340 g/kWh      | 1.85             |
| Supercritical       | 800-880 g CO <sub>2</sub> /kWh          | 0.9                            | 340-380 g/kWh      | 1.59             |
| Subcritical         | ≥880 g CO <sub>2</sub> /kWh             | 1.04                           | ≥380 g/kWh         | 1.33             |

\*Para carbón con poder calorífico de 25 MJ/kg; Nota: El factor de intensidad de CO<sub>2</sub> es la cantidad de dióxido de carbono emitido por unidad de electricidad generada por una planta.

**Fuente:** elaboración propia a partir de (IEA, 2012)\* y (World Coal Association, 2021)\*\*

La tecnología USC más eficiente del mundo actualmente puede ayudar a que las plantas alcancen tasas de eficiencia neta de hasta el 47,5%, significativamente más altas que el promedio global del 34%. Cada punto porcentual de mejora en la eficiencia reduce significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> de las centrales eléctricas de carbón en más de 2 puntos porcentuales, lo que resulta en un 26% menos de CO<sub>2</sub> por MW que la planta de carbón promedio (GE Vernova, 2024).

**Figura 14 Tecnologías HELE**



\*For a 100MW base plant in Asia, this an economic Benefit of \$80M in additional value for our customers..

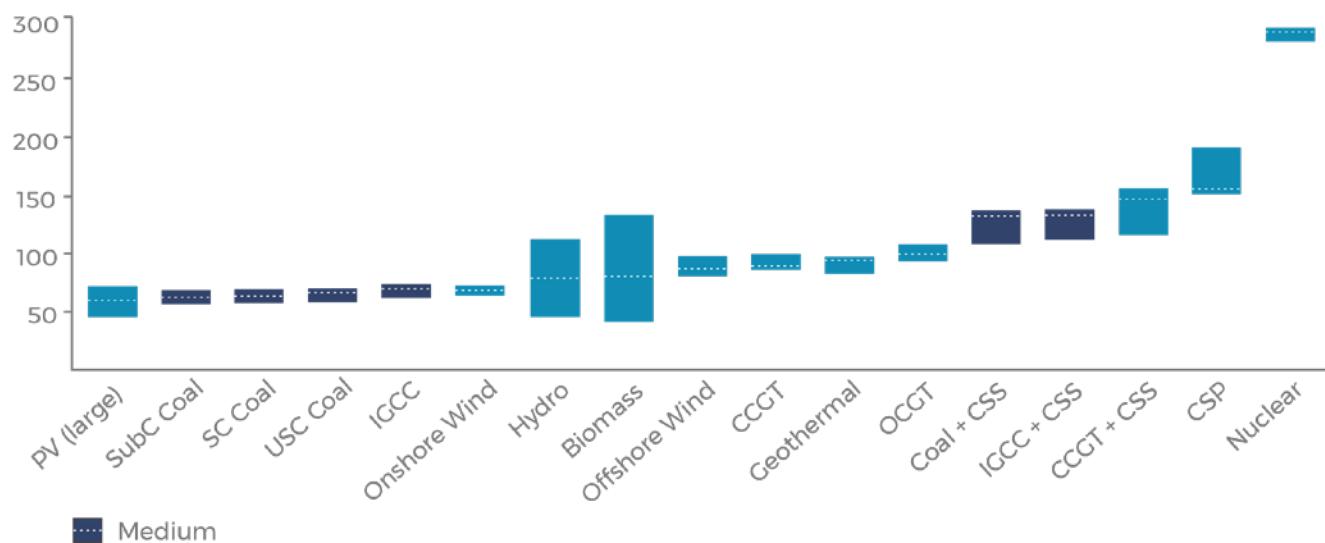
**Fuente:** (GE Vernova, 2024)

De acuerdo a lo presentado en el reporte del World Coal Association (2021), considerando el VALCOE (costo nivelado ajustado al valor de electricidad) para reflejar el costo total para el sistema eléctrico asociado a la elección del despliegue tecnológico, lo cual permite al operador del sistema evaluar diferentes tecnologías de generación en términos comparables, teniendo en cuenta los diferentes impactos del sistema asociados con la implementación de cada tecnología.

El VALCOE se basa en la métrica LCOE incluyendo tres consideraciones adicionales de valor en sistemas de potencia, energía, capacidad y flexibilidad. Así el VALCOE de las tecnologías HELE oscilan para la región ASEAN entre 50 USD/MW y 80 USD/MW, como se observa en la siguiente gráfica (World Coal Association, 2021).

**Figura 15 Costos VALCOE proyectados para tecnologías de generación de energía térmica y renovable bajo supuestos de precios bajos, medios y altos**

### 2040 VALCOE in ASEAN (\$/MWh)



Fuente: (World Coal Association, 2021)

Un ejemplo, de implementación de tecnologías HELE, es planta de generación de energía Huaneng Yuhuan, ubicada en la provincia de Zhejiang en el este de China y corresponde a un proyecto de 1.000 MW a carbón con tecnología de calderas ultra supercríticas y con una eficiencia neta del 46% (Power Technology, 2020).

Según Siemens, un aumento del 1% en eficiencia para una planta típica de 700 MW con estas tecnologías reduce las emisiones durante una vida útil de 30 años en 2.000 toneladas de NOx, 2.000 toneladas de SO<sub>2</sub>, 500 toneladas de partículas y 2,5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Las nuevas unidades también incorporan eliminación de polvo y desulfuración de alta eficiencia (Power Technology, 2020).

### c. Gasificación integrada de ciclo combinado (IGCC)

En este proceso, el carbón se oxida parcialmente en aire u oxígeno a alta presión para producir un gas combustible y luego se produce electricidad a través de un ciclo combinado. En la primera fase, el gas combustible se quema en una cámara de combustión antes de expandir los gases calientes presurizados a través de una turbina de gas, el gas de síntesis caliente producido por el gasificador se trata para limpiar el gas y eliminar las partículas. Los gases de escape calientes se utilizan luego para elevar vapor en un generador de vapor de recuperación de calor antes de expandirlo a través de una turbina de vapor para generar electricidad (Kumar & Kumar, 2018).

Los IGCC que incorporan turbinas de gas con temperaturas de entrada de turbina de 1500 °C se encuentran en desarrollo y podrían alcanzar eficiencias térmicas cercanas al 50%. Las plantas IGCC requieren considerablemente menos agua que las tecnologías de combustión convencionales de carbón pulverizado (IEA, 2012). Además, en comparación con la combustión, la gasificación del carbón opera a una presión más alta y, por lo tanto, el volumen del gas de síntesis es mucho menor que el de los gases de combustión. Los contaminantes están más concentrados en el flujo de gas de síntesis y pueden eliminarse de manera más eficiente (Zhu & Frey, 2012). La gasificación tiene la huella ambiental más baja en comparación con otros sistemas de generación de energía basados en carbón. Los sistemas IGCC son más eficientes que las centrales eléctricas convencionales (Zhu & Frey, 2012).

Los principales componentes de una central IGCC son: Unidad de gasificación, Sistemas de aprovechamiento del calor del gas bruto, Sección de limpieza de gases incluyendo recuperación de azufre, Unidad de separación de aire (en caso de gasificación por soplado de oxígeno). Paquete de turbinas de gas, Generador de vapor de recuperación de calor y Turbina de vapor (Huth & Heilos, 2013).

El costo de las unidades IGCC, según su LCOE oscila entre 65 y 183 dolares por MWh (Roussanaly, y otros, 2019) y (National Energy Technology Laboratory, 2022).

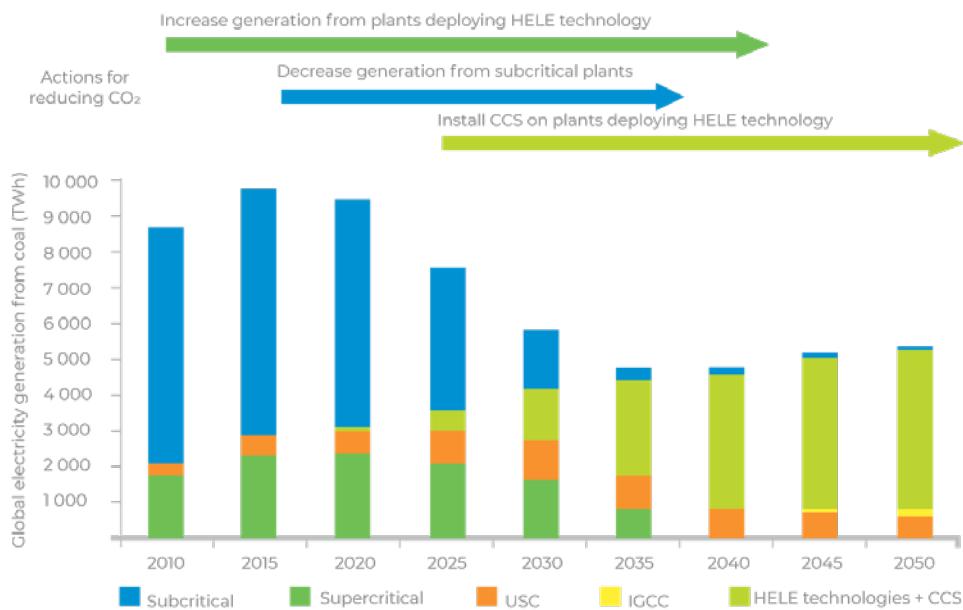
## d. CCUS

Las tecnologías CCUS son tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono, orientadas a eliminar y/o evitar la salida del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera, en este caso del proceso de generación termoeléctrica (CCUS Net Zero Colombia, 2024).

Reequipar las centrales eléctricas de carbón con CCUS proporciona un medio para suministrar energía de bajas emisiones a partir de los activos de carbón existentes, y proporciona servicios de estabilidad como inercia, flexibilidad de rampa y capacidad firme en las horas pico. Esto también haría uso de la infraestructura de transmisión existente y permitiría operar las plantas actuales para que se puedan recuperar las inversiones, al tiempo que se reduce su huella de carbono. Esto es particularmente importante para las economías emergentes de Asia, donde la edad promedio de las centrales eléctricas de carbón es de solo 13 años y se siguen construyendo nuevas plantas (IEA, 2023).

Si bien la modernización con CCUS es técnicamente factible en la mayoría de las instalaciones de generación de energía, factores como el acceso a la infraestructura de transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, la antigüedad de la planta, la capacidad, el control de la contaminación y el diseño de las calderas serán importantes para identificar oportunidades técnicamente viables y de menor costo para la modernización. Las plantas de energía (ultra) supercríticas son mejores candidatas para la modernización, ya que tienen una mayor eficiencia de diseño y es menos probable que requieran mejoras en la caldera o turbina para cumplir con las condiciones de vapor para la captura de CO<sub>2</sub> (IEA, 2023).

**Figura 16 Generación de electricidad a partir de diferentes tecnologías de energía alimentadas con carbón**



**Fuente:** (IEA, 2012)

Note: Carbon capture is integrated with HELE coal-fired units to minimise coal consumption and CO<sub>2</sub> abatement cost.

Las tecnologías de CCUS jugarán un rol fundamental en los escenarios de reducción de emisiones para lograr la carbono neutralidad o los escenarios Net Zero, sin embargo, esto depende en gran medida del progreso tecnológico. La madurez de CCUS varía considerablemente según el tipo de tecnología y la aplicación. Si bien para el caso de su aplicación en la generación de energía a partir de carbón y la producción de hidrógeno se han generado algunos desarrollos, aún no se cuenta con una tecnología madura a un costo competitivo.

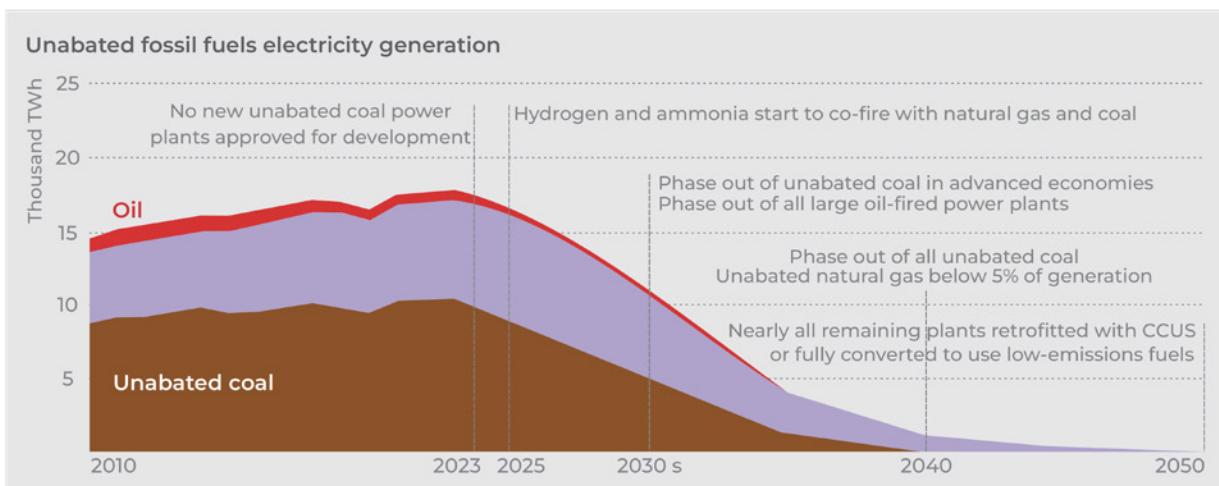
Según la Agencia Internacional de Energía, dos tercios de las reducciones de emisiones acumuladas por CCUS hasta 2070 en el escenario de Desarrollo Sostenible de la IEA, en relación con el escenario de Políticas Declaradas provienen de tecnologías que se encuentran actualmente en la etapa de prototipo o demostración. Además, existe una desconexión entre el nivel de madurez de las tecnologías individuales de captura de CO<sub>2</sub> y las áreas en las que son más necesarias (IEA, 2020).

Por su parte, el transporte y el almacenamiento de CO<sub>2</sub> se han demostrado durante varias décadas, pero la innovación puede mejorar las tecnologías existentes y generar nuevas oportunidades, incluido el transporte de CO<sub>2</sub> a gran escala y tecnologías más avanzadas para el seguimiento a largo plazo del CO<sub>2</sub> almacenado. La innovación en las aplicaciones de uso del CO<sub>2</sub>, incluidos los combustibles sintéticos y los productos químicos, será importante para lograr reducciones de costos. Mientras, La capacidad teórica para almacenar CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas profundas a nivel mundial es enorme y excede con creces la necesaria para alcanzar emisiones netas cero; en el Escenario de Desarrollo Sostenible, sólo se utiliza el 3% de la capacidad potencial de almacenamiento global. Será fundamental realizar más exploraciones y evaluaciones para generar confianza en la disponibilidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en regiones clave (IEA, 2020).

## Unabated fossil fuels in electricity generation

Electricity output from unabated fossil fuels falls by 40% to 2030 and virtually disappears by 2050, as plants are run less, retired, retrofitted with CCUS or repurposed to use low-emissions fuels.

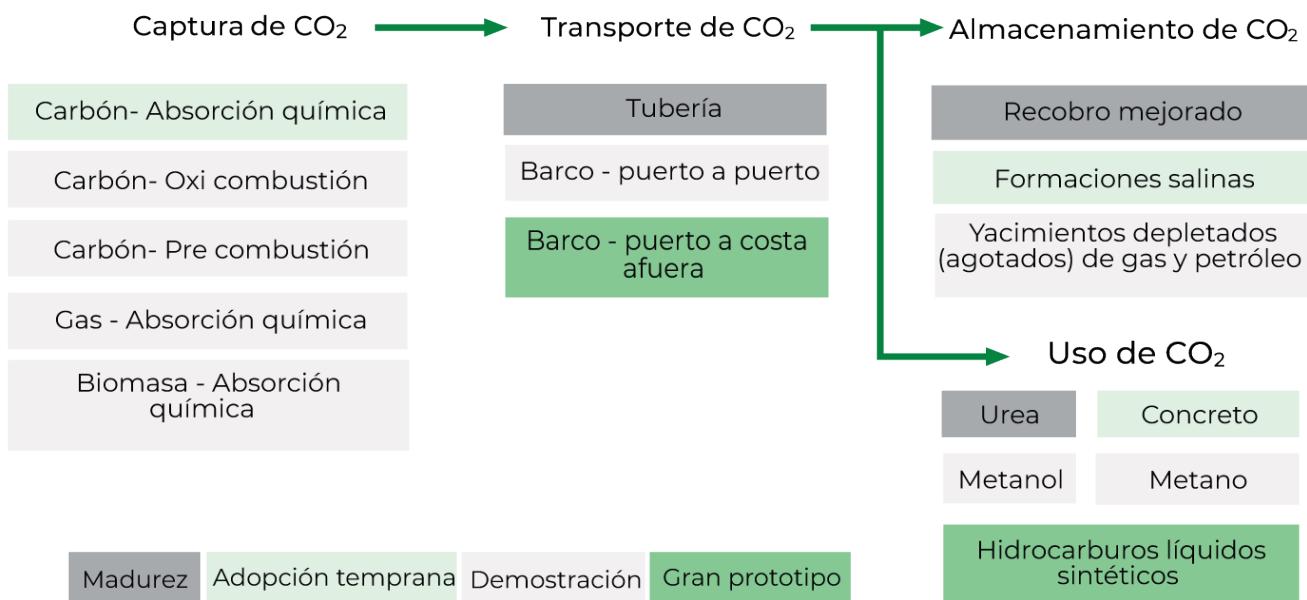
95%  
REDUCTION  
BY 2040



El cambio de combustible de biomasa o la combustión conjunta en plantas de carbón o gas también puede mitigar las emisiones de energía y, cuando se combina con CCS, puede generar emisiones negativas.

Para la generación de energía, existen diferentes alternativas tecnológicas para la aplicación de CCUS, en diferentes etapas de madurez, desarrollo tecnológico y adopción en el mercado:

**Figura 17 Nivel de preparación tecnológica para la generación de energía**



**Fuente: adaptado de (IEA, 2020)**

La captura del CO<sub>2</sub> busca separar el dióxido de carbono de los otros gases de combustión (flue gas) producto del proceso de generación de energía:

- Pre combustión: En este proceso se trata el combustible para convertirlo en dos flujos separados de dióxido de carbono y de hidrógeno.
- Oxicombustión o Quema de combustible: En presencia de oxígeno puro garantiza que los gases de escape sean (flujo altamente concentrado) fácil de separar.
- Separación CO<sub>2</sub> después de la combustión o Absorción química: Consiste en el uso de solventes y membranas para absorber este gas.

Dentro de las tecnologías para la captura del CO<sub>2</sub> físico-químicas se encuentran (GAIA, 2024):

#### › Solventes/sorbentes

- › Químicos: monoetanolamina, amoníaco acuoso, solvay modificado
- › Físicos: selexol, rectisol, fluor, tamices moleculares, carbón activado o carbón amoxiado, zeolitas, compuestos de litio

#### › Membranas

- › Separación de gases: polifenilenoxido, polidimetilsiloxano
- › Absorción de gas: polipropileno
- › Sistema cerámico
- › Membrana amina híbrida

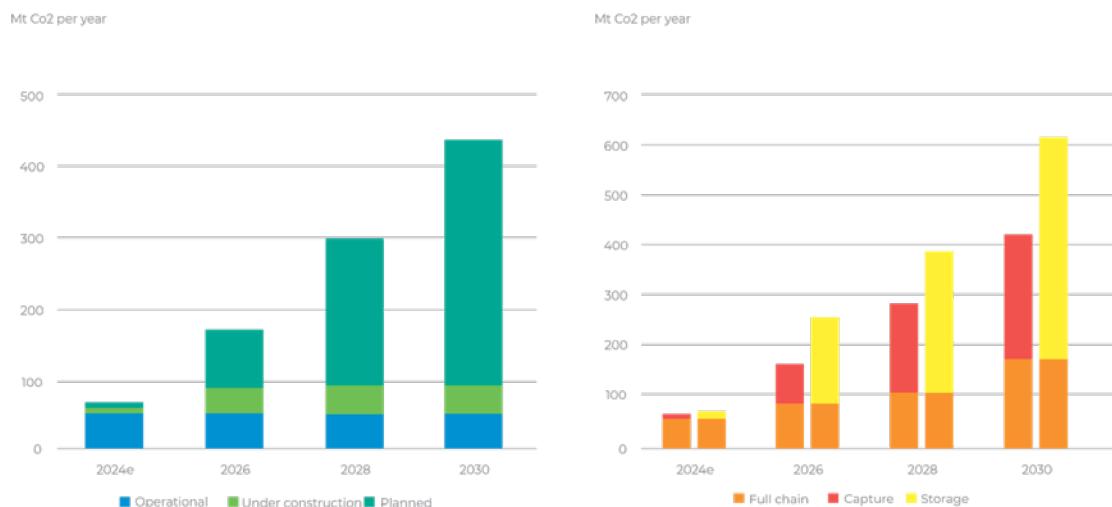
#### › Otros

- › Destilación o refrigeración: criogénicos
- › Líquidos iónicos
- › Sistema enzimático
- › Combustión química en bucle: combustión óxido metálica

Actualmente, el 90% de la capacidad operativa se ubica en Estados Unidos, Brasil, Australia, China, Canadá y Qatar. De los cuatro proyectos CCUS que entraron en funcionamiento durante la primera mitad de 2023, tres tienen su sede en China y uno en Estados Unidos. Estados Unidos también acoge tres de las cinco instalaciones de captura más grandes, mientras que la más grande está en Brasil y la tercera planta más grande en Australia. Sin embargo, la distribución geográfica de los proyectos de captura en desarrollo se están diversificando y actualmente se desarrollan proyectos en más de 45 países (IEA, 2023).

La siguiente figura muestra el despliegue mundial de las tecnologías CCUS con aplicación en diferentes sectores, incluyendo todas las instalaciones de captura de CO<sub>2</sub> operativas, en construcción y planificadas con una capacidad anunciada de más de 100 000 toneladas por año (o 1000 toneladas por año para las instalaciones de captura directa de aire) y el cronograma previsto. Se incluye en el escenario 2024e toda la capacidad anunciada que podría entrar en funcionamiento a finales de 2024.

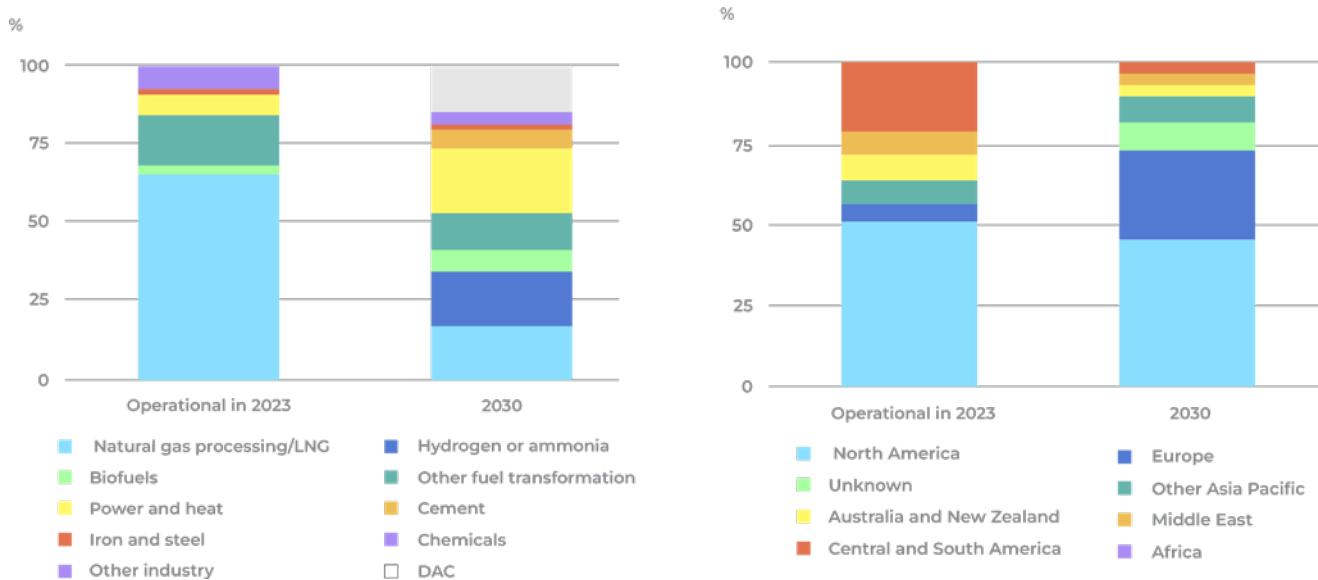
**Figura 18 Capacidad de captura operativa y planificada**



**Fuente: (IEA, 2024)**

Se espera que hacia el 2030, el desarrollo de estas tecnologías sea más amplio en diferentes sectores, pasando de ser una tecnología predominantemente aplicada en la refinación de gas y gas natural licuado a tener mayor participación en industrias como la generación de energía, la producción de hidrógeno y amonio, la transformación de otros combustibles, y el aumento de tecnologías de captura directa del aire.

**Figura 19 Capacidad de captura operativa y planificada por sector y por región**



Fuente: (IEA, 2024)

## › Costos

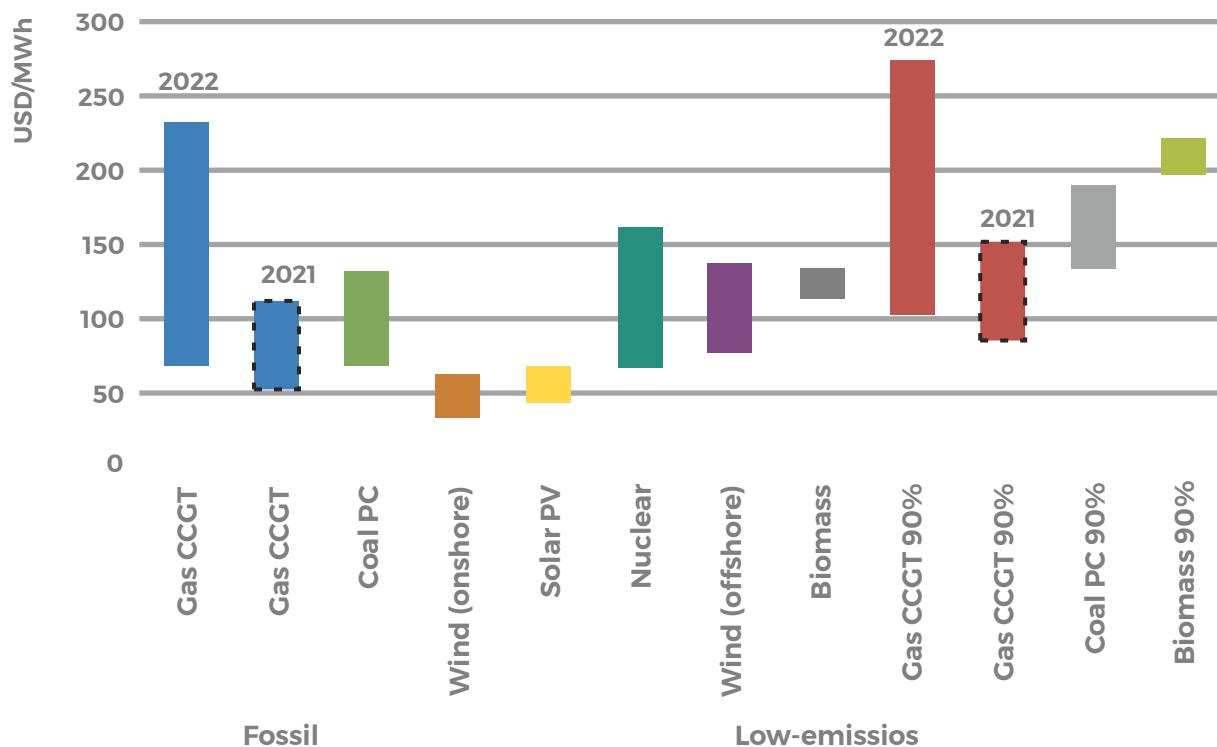
El costo de captura, secuestro, uso y almacenamiento de 1 tCO<sub>2</sub> es mayor de 80 USD. Muchos proyectos no han alcanzado la decisión final de inversión y se necesita un mayor apoyo político para impulsar la demanda y facilitar la nueva infraestructura habilitadora (GAIA, 2024).

Actualmente, existen tecnologías de captura que se encuentran en desarrollo y en etapa de pilotos que pueden representar costos más competitivos, en especial para termoeléctricas a carbón que pueden reducir los costos en valores cercanos a los 50 USD por tonelada, sin embargo, estos dependen del factor de utilización de las centrales de generación.

Se requieren precios del carbono entre 40 y 60 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> para que las rutas basadas en CCUS alcancen el punto de equilibrio, con las rutas de no abatimiento de emisiones para aplicaciones de alta concentración, y entre 80-170 USD/t CO<sub>2</sub> para aplicaciones diluidas (IEA, 2023).

También es necesario reducir el uso de energía y los costos de las aplicaciones CCUS, que siguen siendo altos en comparación con las tecnologías que no han disminuido sus emisiones para la mayoría de las aplicaciones. Los plazos prolongados pueden obstaculizar aún más el progreso, en particular en lo que respecta al almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Si bien los nuevos modelos de negocio pueden mitigar algunos de estos desafíos, al reducir los costos y los plazos de entrega, también traen consigo nuevas complejidades, lo que crea la necesidad de que los gobiernos coordinen toda la cadena de valor (IEA, 2023).

**Figura 20 LCOE de la electricidad de diferentes tecnologías al 2022**



Fuente: (IEA, 2023)<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Notas: CCGT = turbina de gas de ciclo combinado; PC = combustión pulverizada; PV = fotovoltaico. El carbón incluye tanto el ciclo de vapor ultra supercrítico como los ciclos combinados integrados. Supuestos principales: CAPEX (USD/kW): 2630-5320 (carbón), 4330-7600 (carbón 90%), 1160 (CCGT de gas), 2280 (CCGT de gas 90%), 3730 (biomasa), 6580 (biomasa 90%), 1100-1750 (eólica terrestre), 2820-4060 (eólica marina), 640-1120 (solar fotovoltaica), 2 800-6 600 (nuclear); eficiencia (% LHV): 42-43% (carbón), 60% (CCGT de gas), 43% (biomasa), 33-34% (carbón 90%), 52% (CCGT de gas 90%), 34% (biomasa 90%); factores de carga: 85% (centrales térmicas), 26-42% (eólica terrestre), 32-50%

La estimación del LCOE proporciona una parte del panorama, al comparar la rentabilidad relativa de las tecnologías que operan de forma independiente, pero no considera el valor de las tecnologías de generación de energía individuales que operan dinámicamente como parte de un sistema eléctrico, particularmente en lo que respecta a garantizar la estabilidad y flexibilidad de la red. Las plantas de energía equipadas con CCUS pueden proporcionar generación estable y gestionable con bajas emisiones, lo que puede reducir el riesgo de falla de un sistema y potencialmente aumentar la cantidad de electricidad renovable que puede integrarse en el sistema general. Las políticas de descarbonización energética que tengan en cuenta esta flexibilidad y valor de capacidad de los activos de generación de energía pueden respaldar el despliegue de CCUS en este sector.

Algunos países han realizado avances significativos en políticas orientadas al desarrollo de esta tecnología:

- **Estados Unidos:** La Ley de Reducción de la Inflación de 2022 de los Estados Unidos incluyó aumentos importantes al crédito fiscal del 45Q para CCUS, que apoya la utilización de CO<sub>2</sub> al proporcionar créditos fiscales valorados ahora en 60 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> utilizada. En mayo de 2023, el gobierno de EE. UU. también lanzó Clean Fuels & Products Shot, cuyo objetivo es apoyar rutas alternativas que puedan reducir la intensidad de las emisiones de combustibles y productos químicos en un 85% para 2035, incluida la utilización de CO<sub>2</sub>.
- **Unión Europea:** En abril de 2023, la Unión Europea aprobó la propuesta ReFuelEU Aviation, que impone mandatos de mezcla de combustibles sintéticos para la aviación, que aumentarán del 0,7 % en 2030 al 28 % en 2050, y tres proyectos de CCU centrados en los combustibles sintéticos recibieron financiación del último gran Fondo de Innovación de la UE. -Convocatoria a escala en 2022.
- **Bélgica:** En diciembre de 2022 se puso en funcionamiento la primera planta de captura a gran escala que convierte las emisiones de acero en etanol.
- **Canadá:** El presupuesto federal de 2022 propuso un crédito fiscal a la inversión para proyectos CCUS entre 2022 y 2030, valorado en 37,5% para equipos de utilización.

## Proyectos relacionados en el sector de energía y/o con uso de carbón

**Tabla 8 Proyectos de CCUS en operación a 2023, en el sector de energía o con uso de carbón**

| Nombre del proyecto                                    | País           | Tipo de proyecto | Tipo de construcción         | Año de operación | Capacidad estimada (MTon/año) |
|--|----------------|------------------|------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Boundary Dam CCS (SASK Power)                          | Canadá         | Cadena completa  | Retrofit Generación a carbón | 2014             | 1                             |
| China Energy Taizhou power (Jiangsu)                   | China          | Captura          | Retrofit Generación a carbón | 2023             | 0.5                           |
| China Energy Guohua Jinjie Power (Shaanxi)             | China          | Cadena completa  | Retrofit Generación a carbón | 2021             | 0.2                           |
| Great Plains Synfuel Plant (ND) Weyburn-Midale (SK)    | Estados Unidos | Cadena completa  | Retrofit Carbón a gas        | 2000             | 3                             |
| Jiling Petrochemical CCUS (Nanjing refinery) (Jiangsu) | China          | Cadena completa  | Retrofit Carbón a líquidos   | 2023             | 0.1                           |
| Petra Nova Carbon Capture (TX)                         | Estados Unidos | Cadena completa  | Retrofit Generación a carbón | 2016-2020;2023   | 1.4                           |

Fuente: adaptado de (IEA, 2023)

### Caso Saks Power (Sask Power, 2021)

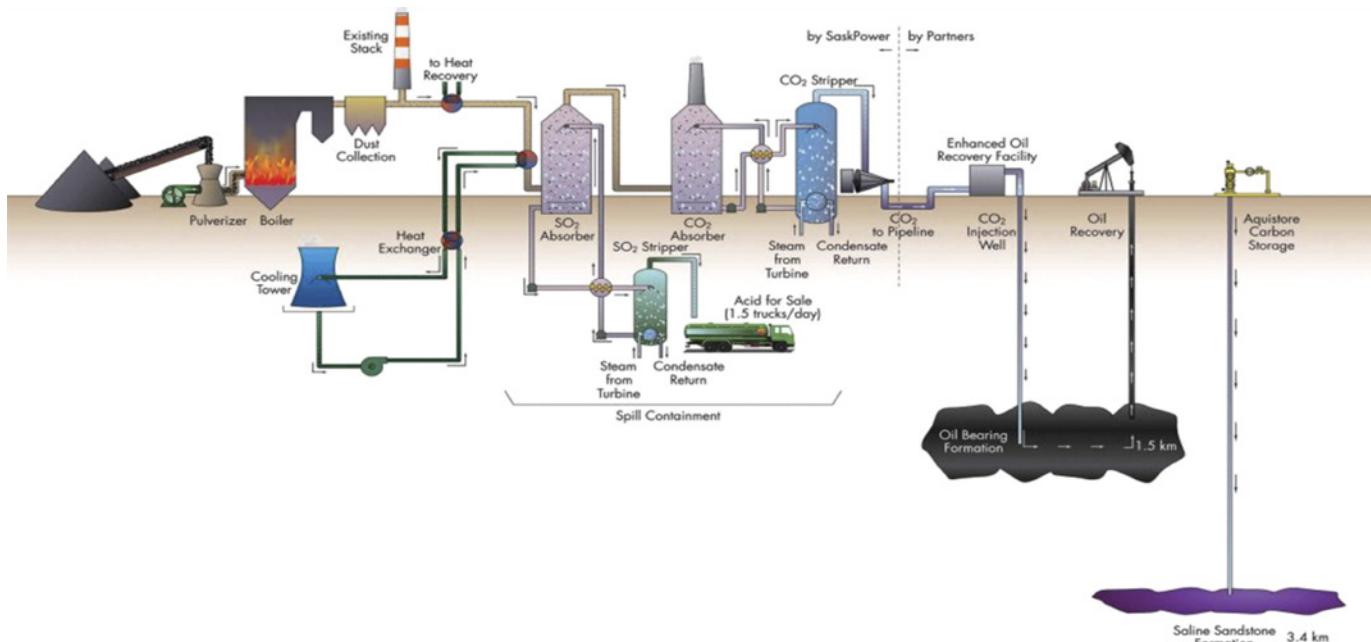
Facilidad de CCS integrada en la Unidad 3 de la Central eléctrica Boundary Dam es el primer proyecto en el mundo en integrar completamente un proceso de CCS en una central eléctrica que funciona con carbón en el 2014, que es capaz de reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> provenientes del carbón en un 100% y del CO<sub>2</sub> en un 90%. Esta nueva infraestructura extendió la vida útil de la Unidad 3 y se ejecutó como un proyecto de dos partes: La primera la actualización de la isla de energía y la segunda la modernización con CCS.

El proyecto se desarrolla considerando las condiciones económicas favorables del momento y con la ayuda de una subvención federal de 240 millones de dólares canadienses.

El carbono capturado es utilizado para la recuperación mejorada de petróleo en un campo cercano y de igual manera se inyecta en un yacimiento salino profundo en un proyecto de investigación llamado Aquistore.

(eólica marina), 13-21% (solar fotovoltaica); Precios del combustible (USD/GJ): 2-7 (carbón), 4-14 (gas 2021), 7-32 (gas 2022), 7-9 (biomasa); tasas de captura: 90%; Transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (USD/t CO<sub>2</sub>): 30; Precio del CO<sub>2</sub> (USD/t CO<sub>2</sub>): 0-65; vida útil de la planta (años): 40 (carbón, biomasa, nuclear), 35 (CCGT de gas), 25 (renovables); descuento tasa/coste de capital: 8%.

**Figura 21 Proceso completo Captura de CO<sub>2</sub> en Boundary Dam 3**



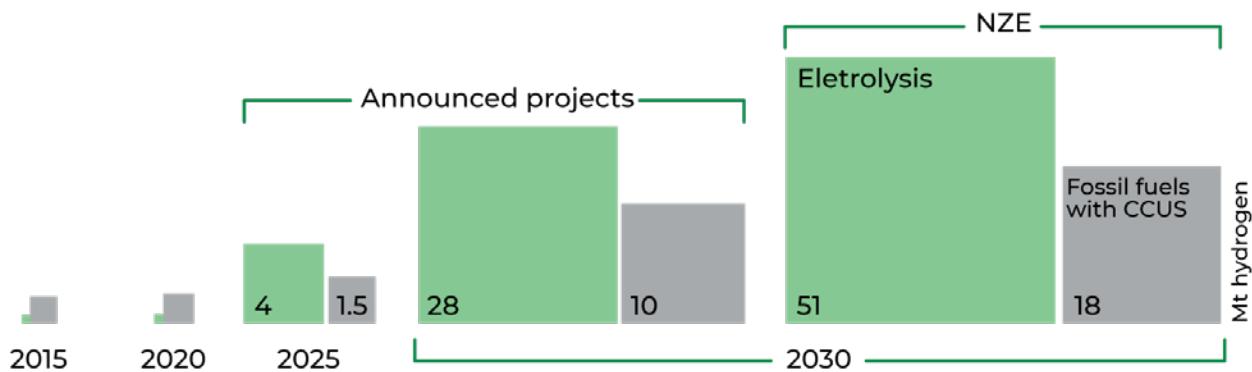
Fuente: (Sask Power, 2021)

## e. Hidrógeno

El hidrógeno es una de las alternativas que en la actualidad se encuentra en auge y se prevé como una alternativa energética de gran potencial. Existen diferentes fuentes para obtener el hidrógeno, dentro de las cuales se encuentran las siguientes que están asociadas al uso del carbón:

- **Hidrógeno amarillo:** El hidrógeno amarillo es aquel en el que la electricidad utilizada para la electrólisis procede de fuentes mixtas, desde energías renovables hasta combustibles fósiles. En el caso de Colombia, la producción de hidrógeno a partir de la red emitiría 8,2 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> (Ministerio de Minas y Energía , 2021)
- **Hidrógeno azul:** hidrógeno que genera emisiones de CO<sub>2</sub> que se capturan para ser posteriormente almacenadas o reutilizadas. Se trata de un hidrógeno de bajas emisiones. El hidrógeno azul se incluye dentro de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE). El factor emisión puede oscilar entre 1 y 2 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> (Ministerio de Minas y Energía , 2021)
- **Hidrógeno negro, café y gris:** Son hidrógenos producidos a partir de materias primas ricas en hidrocarburos, como gas metano, carbón u otros combustibles fósiles. El hidrógeno negro o marrón es un producto de la gasificación del carbón y durante su producción se libera CO<sub>2</sub>. El factor de emisión del hidrógeno a partir de carbón es de 20 kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub> (Ministerio de Minas y Energía , 2021).

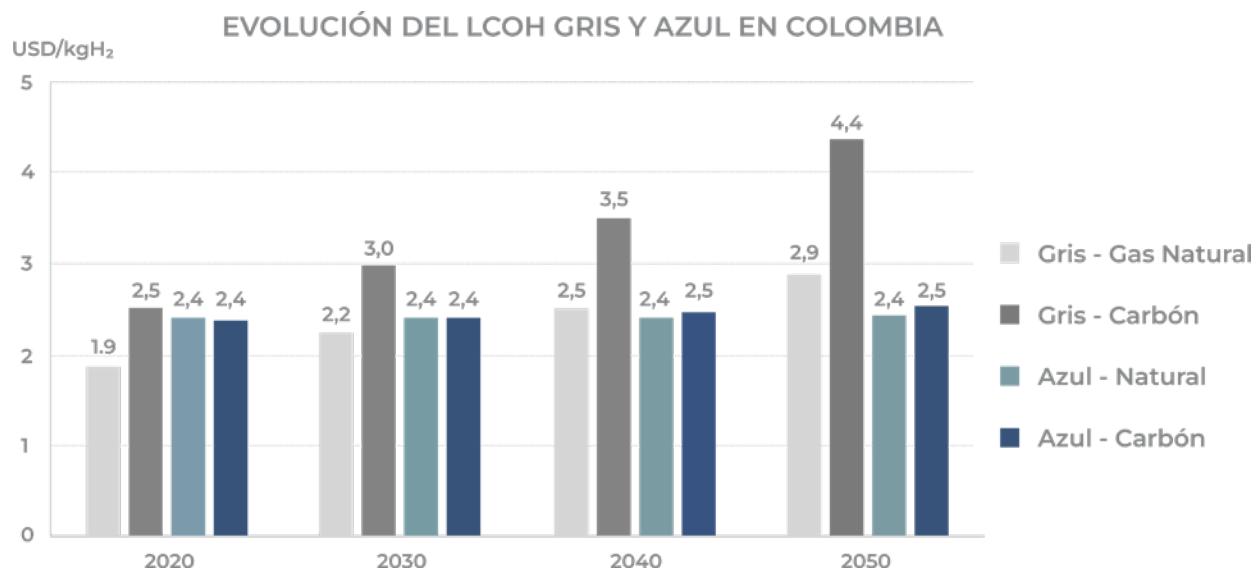
## Low-emissions hydrogen production



En la actualidad, la mayoría del hidrógeno producido en el mundo proviene de combustibles fósiles, en donde el hidrógeno negro, marrón y gris representa el 99,6% del total de la producción mundial. Es por esto, que los costos de producción están ligados a los precios de los combustibles fósiles. Por otro lado, los costes de producción del hidrógeno verde están estrechamente ligados a los precios de la electricidad. Para el 2040, se espera que el costo de producción del hidrógeno verde se reduzca alrededor de un 65%, gracias a la competitividad de los precios de la fotovoltaica, mientras que los costos de producción del hidrógeno gris y azul se espera que aumenten más de un 80% debido al encarecimiento de los precios de los combustibles fósiles (Renewable Energy Magazine, 2024).

Según la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia, considerando los incentivos de la ley 2099 de 2021, la evolución esperada del costo nivelado del hidrógeno (LCOH<sub>2</sub>O) azul y gris para las próximas décadas indica que los costos del hidrógeno azul se mantienen prácticamente constantes debido a que la reducción de costos de las tecnologías de captura de CO<sub>2</sub> se ve compensada por el aumento de los precios del gas y del carbón. El LCOH del hidrógeno gris, por el contrario, aumenta progresivamente debido al impacto de los costos crecientes de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

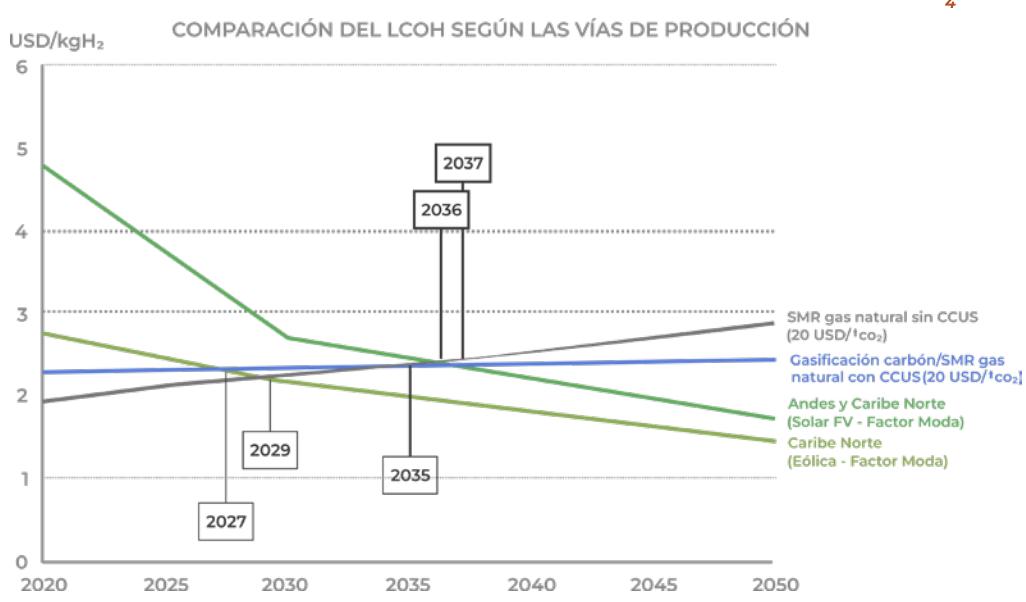
**Figura 22 LCOH gris y azul a partir de gas natural y carbón**



Fuente: (Ministerio de Minas y Energía , 2021)

Según el Ministerio de Minas y Energía (2021), el aprovechamiento de las infraestructuras existentes de las industrias minera, petrolífera y gasista podría dar lugar a valores de LCOH azul aún más competitivos que acortarían los plazos para alcanzar el punto de equilibrio entre el LCOH azul y gris en algunas industrias.

**Figura 23 Comparativa del LCOH según las rutas de producción**



Fuente: (Ministerio de Minas y Energía , 2021)

<sup>4</sup> Se muestra sólo la curva de H2 azul a partir de gas natural ya que la obtenida con carbón es similar.

Según el análisis de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia, a corto plazo, el H2 azul es la opción de bajas emisiones más favorable, sobre todo si se aprovechan las infraestructuras industriales existentes. Mientras que para el 2030, la producción de hidrógeno verde en las zonas con mejor recurso eólico del país se visualiza como la alternativa más competitiva. Entre 2030 y 2040, se espera la coexistencia del hidrógeno azul y verde y a partir de 2035, el H2 azul (a partir de gasificación de carbón o reformado de GN) resultaría más competitivo incluso que el H2 gris debido al aumento de los precios del CO2 y el descenso de costos de las tecnologías de captura (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

#### f. Biomasa

Otra alternativa tecnológica para las plantas alimentadas con carbón, para aumentar su eficiencia y reducir sus emisiones es la hibridación de combustibles o co-combustión carbón y biomasa.

Como las plantas alimentadas con carbón generalmente funcionan con parámetros de vapor mucho más altos que las plantas eléctricas alimentadas con biomasa, la biomasa cogenerada se convierte a una mayor eficiencia. Debido a que la biomasa incorpora CO2 durante su período de crecimiento, se la considera un combustible neutro en carbono que brinda una oportunidad para la reducción directa de emisiones. Esta es una tecnología que ha sido probada y desarrollada en diferentes países como Reino Unido y Dinamarca.

Según la Agencia Internacional de Energía, a pesar de las ventajas, varios factores limitan el uso de biomasa para la generación de energía. La composición de la biomasa es muy diferente a la del carbón. La biomasa puede contener mayores niveles de humedad, hasta el 50%, lo que afecta negativamente combustión al absorber calor durante la evaporación.

Además, los valores caloríficos de la biomasa son inferiores a los del carbón y la biomasa es menos densa que el carbón, por lo que es necesario recoger, manipular, transportar y almacenar mayores volúmenes. Otra barrera es el suministro de biomasa ya que no existe suficiente infraestructura para la recolección y transporte hacia las centrales térmicas, elevando costos logísticos.

Los productos de madera son un producto más consistente para el co-firing y la oferta se ve menos afectada por la cuestión de la estacionalidad. Se están dirigiendo esfuerzos sustanciales al desarrollo de la torrefacción<sup>5</sup> para hacer de la biomasa un producto más uniforme y que se asemeje más a las características del carbón. La peletización ya se utiliza a gran escala: por ejemplo, RWE ha abierto una instalación de pellets de madera de 750 000 t/año en Georgia, Estados Unidos (IEA, 2012).

La co-combustión del 10% al 15% del contenido energético, se estima que puede generar poco o ningún daño en una central térmica a gran escala, sin embargo, correspondería a una cadena de suministro de biomasa de alrededor de 250 a 350 MWth, lo que puede presentar desafíos logísticos y económicos.

<sup>5</sup> Proceso de calentamiento de biomasa (normalmente a temperaturas que oscilan entre 200 °C y 320 °C) para reducir la humedad o las impurezas, que cambia las propiedades de la biomasa para obtener una calidad de combustible mucho mejor para aplicaciones de combustión y gasificación.

Dentro de las opciones tecnológicas disponibles para el uso de la biomasa en centrales térmicas a carbón se cuenta con (De Gracia, 2021):

- Sustitución de la caldera de carbón pulverizado por una caldera de lecho fluidizado circulante (CFB Boiler), la cual permite utilizar un amplio rango de combustibles, pero con un alto costo de inversión.
- Adicionar equipos de pulido de biomasa a la planta actual, lo cual requiere usar biomasa altamente seca y depende del suministro y/o disponibilidad de biomasa, la cantidad de carbón que podrían reemplazar sería baja.
- Integración de una planta de gasificación de biomasa a la caldera de carbón. Esta solución permite utilizar un amplio rango de biomasa y otros combustibles siendo una inversión de bajo costo, pudiendo utilizar el carbón existente y que requiere poco tiempo para su implementación. La gasificación de madera, turba y biomasa forestal da como resultado syngas que es quemado junto con carbón en la caldera existente.

### **g. Hibridación solar – Térmico**

Otra alternativa corresponde a plantas híbridas, que consisten en centrales de distintas tecnologías que se combinan para obtener el mayor provecho de los beneficios individuales de cada una. En este caso, la hibridación solar con una central térmica a carbón busca combinar los beneficios medioambientales de la energía solar con las ventajas operacionales de una planta térmica convencional, con la ventaja de costos compartidos de la mayoría de los equipos. Esto reduce significativamente el costo nivelado de electricidad del componente solar. La combinación estas dos tecnologías en un solo ciclo de potencia capitaliza las fortalezas de ambos (De Gracia, 2021).

Los sistemas híbridos que combinan plantas de concentración solar con plantas convencionales de carbón comparten el bloque de potencia y sus principales componentes. Así, como resultado del proceso de hibridación, parte de la energía necesaria para generar vapor procede del sol, reduciendo el consumo de combustible fósil y una disminución en las emisiones contaminantes. Un beneficio directo es que dicha reducción de combustible compensa la alta inversión inicial. Además, según estudios de EPRI, una planta con colector cilindro parabólico utilizado para la hibridación, puede proveer alrededor de un 20-25% de la energía requerida para el ciclo de vapor (De Gracia, 2021).

Otros beneficios de esta alternativa tecnológica incluyen:

- Extensión de la vida útil de las tecnologías convencionales.
- Mayor fiabilidad de la generación, en donde la hibridación carbón-solar puede ser considerada como un generador completamente gestionable.
- La hibridación ofrece la capacidad de despachar en potencia base y de pico a la red en todo momento.

- Uso de los beneficios que ofrece el almacenamiento térmico definiendo a la planta como una fuente de energía renovable gestionable.
- Al tener mayor energía primaria, puede aumentar el flujo de vapor generado, ofreciendo un mayor factor de capacidad de la planta y una mayor eficiencia media de la misma, así como un posible aumento de la potencia nominal.
- Ofrece flexibilidad a la operación de la planta alternando diferentes fuentes de energía primaria.
- Reducción de costes de generación de energía y, por lo tanto, el coste de la electricidad para el consumidor.
- La hibridación reducirá los niveles de manejo de carbón y cenizas, reduciendo la carga en componentes como filtros de mangas, molinos de pulverización y trituradoras de cenizas.

Adicionalmente, otra alternativa consiste en complementar los proyectos de generación de energía con la instalación de fuentes renovables como la solar fotovoltaica, en lugares como los patios de ceniza, techos disponibles en las instalaciones, entre otros, para abastecer las necesidades energéticas propias de la central, por ejemplo, para los servicios auxiliares, consumo eléctrico de los edificios administrativos, entre otros.

#### **h. Otros**

- **Reutilización de las plantas de carbón:** Reducir las operaciones para centrarse en la adecuación del sistema o en los servicios de flexibilidad. Esto significa, que una planta de carbón produce menos electricidad durante un cierto período, pero permanece disponible en los momentos en que las necesidades del sistema son más altas, y está disponible para subir y bajar para satisfacer las necesidades de flexibilidad, lo que contribuye a la fiabilidad de los sistemas de energía.
- **Almacenamiento de energía:** Sistema BESS, sistema de almacenamiento con baterías, que este sistema permite absorber y entregar energía desde y hacia el sistema eléctrico para compensar las desviaciones de frecuencia del sistema interconectado (Enel, 2022). Actualmente en Colombia, la planta Termozipa utiliza esta tecnología.
- **Amoniaco:** El amoniaco, que no emite CO, cuando se quema, es un combustible alternativo para reducir las emisiones de las centrales eléctricas de carbón. Se está comenzando a evaluar las oportunidades de co-firing de amoniaco a pequeña escala, con la vista en la aplicación de plantas comerciales en los próximos años. La bioenergía sostenible es otra opción para permitir que las instalaciones de energía de carbón continúen contribuyendo a la flexibilidad y garantizando una capacidad adecuada al tiempo que reducen las emisiones de CO. Sin embargo, las materias primas de biomasa y amoniaco utilizadas deben considerarse sostenibles para garantizar una reducción neta de las emisiones de CO<sub>2</sub> (IEA, 2023).
- **Transporte del carbón:** Vehículos como camiones y trenes de bajas emisiones son una alternativa para gestionar las emisiones asociadas al transporte del carbón, eslabón fundamental en la consolidación de una cadena de valor cada vez más sostenible.

➤ **Minería sostenible:** Consiste en desarrollar los recursos minerales y energéticos del país, de manera que maximicen los beneficios económicos y sociales, al tiempo que minimizan los impactos ambientales. Busca la implementación de tecnologías sostenibles e innovadoras para la explotación y gestión de los minerales y promueve la excelencia operativa y la implementación de herramientas digitales, aumenta la productividad, promueve la responsabilidad social, la transparencia de la información y fortalece la actividad garantizando la inclusión, igualdad, salud y seguridad laboral (Grupo Hidráulica, 2022).

En Colombia, la Asociación Colombiana de Minería - ACM promueve la aplicación del Estándar de minería sostenible TSM, que es un sistema de desempeño desarrollado por la Asociación Minera Canadiense que apoya a las empresas mineras a gestionar su estrategia de sostenibilidad bajo los principios rectores de Responsabilidad, Transparencia y Credibilidad. Bajo este estándar las instalaciones evalúan su propio rendimiento anualmente con respecto a cada indicador de los protocolos de comunidades y personas, responsabilidad ambiental y cambio climático, asignando una clasificación a través de una letra que refleja su desempeño, desde el Nivel C al Nivel AAA. Los resultados de desempeño de cada instalación se publican en el sitio web de cada empresa y de la ACM. Las instalaciones deben verificar externamente sus resultados cada tres años. Los resultados brindan a las comunidades locales una perspectiva significativa acerca del estado de la mina aledaña (ACM, 2023).

➤ **Estrategias de Economía circular:** Las estrategias de economía circular son una alternativa para fortalecer una cadena de valor del carbón más sostenible. Estas estrategias se centran en los subproductos del proceso de combustión del mineral e incluyen entre otros:

- Gestión de cenizas: Entrega de las cenizas a empresas cementeras para uso en la fabricación del concreto. La adición de las cenizas al concreto reduce su costo, se utiliza menos cemento y se mejora algunas de sus propiedades como su trabajabilidad, durabilidad, densidad y sangrado, su impermeabilidad, su resistencia al ataque químico sobre todo de sulfatos y su resistencia a la compresión, generando beneficios económicos y ambientales de re-aprovechamiento del residuo más relevante que generan las termoeléctricas (Arbeláez, 2024).
- Venta de azufre y precipitados para la industria
- Uso de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales para abono de zonas verdes
- A futuro, el CO<sub>2</sub> capturado mediante tecnologías CCUS y su uso para recobro mejorado o para otros usos industriales.

A close-up photograph of a person's hands and torso. The person is wearing a white dress shirt and a dark, patterned necktie. They are holding a silver clipboard with a sheet of paper attached. A black pen is resting on the clipboard. The person appears to be writing or signing the document. The background is plain and light-colored.

### **3. Políticas y financiamiento en Colombia**

Las señales de política y la disponibilidad de financiamiento e incentivos son las principales barreras para la adopción de tecnologías que permitan realizar un uso eficiente y más responsable del carbón. Colombia particularmente, cuenta con grandes reservas de un mineral de alta calidad, que es y puede seguir siendo aprovechado como insumo fundamental para garantizar la soberanía energética del país, permitiendo percibir los beneficios económicos y sociales asociados a la actividad minera y apostarle a una transición energética justa, segura y gradual basada en tecnologías, que permita aprovechar capacidades, infraestructuras y recursos existentes.

Actualmente, el sector productivo asociado al carbón, enfrenta retos importantes para acceder a mecanismos de financiación tradicional debido a la tendencia mundial en desinvertir en activos relacionados con la explotación y aprovechamiento de este combustible fósil, lo que dificulta que facilidades actuales puedan invertir en la adopción de nuevas tecnologías como las planteadas en este documento.

Para el caso de tecnologías como el CCUS, los gobiernos podrían acelerar el despliegue en las centrales eléctricas de carbón a través de políticas específicas como el precio al carbono, la concesión de financiación para proyectos de CCUS, incentivos fiscales y contratos por diferencia de carbono. Además, el aumento de la financiación para proyectos piloto o de demostración a gran escala puede ayudar a reducir los costos y aumentar las tasas de captura. El apoyo simultáneo a la infraestructura de CO<sub>2</sub>, transporte y almacenamiento también es vital, y los gobiernos pueden desempeñar un papel clave en la identificación y financiación estratégica de CO<sub>2</sub>, redes de transporte y sitios de almacenamiento.

Para el caso de Colombia, en materia de transición energética, se cuenta con diferentes instrumentos, en el marco de los cuales se podría promover e incentivar la adopción de nuevas tecnologías en el sector eléctrico para el uso eficiente del carbón:

- Ley 1715 de 2014 que genera el marco para el establecimiento de incentivos tributarios, arancelarios o contables en materia energética.
- Ley 2099 de 2021, ley de la transición energética, la cual habilita las tecnologías de CCUS e hidrógeno, como oportunidades tecnológicas para el sector eléctrico.
- La Hoja de ruta del hidrógeno, plantea las oportunidades para el hidrógeno azul en el marco del desarrollo de las tecnologías CCUS y la economía del hidrógeno.
- Estrategia Nacional de Financiamiento Climático, instrumento que plantea una alternativa para la financiación de nuevas tecnologías orientadas a la mitigación del cambio climático.
- Impuesto al carbono y mecanismo de no causación: desde el 2023 empezó a regir la gradualidad en la aplicación del impuesto al carbono para el consumo del carbón térmico. Para los años 2023 y 2024, el valor corresponde al 0%, para el 2025 el valor corresponde al 25%, para el 2026 se aplica el 50%, en el 2027 el 75% y a partir del 2028 se aplica la tarifa plena.

Por su parte, el mecanismo de no causación, permite que el impuesto nacional al carbono no se cause para los sujetos pasivos que certifiquen ser carbono neutro, ya sea que la

certificación sea obtenida directamente por el sujeto pasivo o a través del consumidor o usuario final, de acuerdo con la reglamentación que expida el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. La no causación del impuesto nacional al carbono no podrá exceder en ningún caso el cincuenta por ciento (50%) del impuesto causado.

Este instrumento de precio al carbono es una forma de incentivar la acción por parte de los consumidores del carbón térmico para optimizar el consumo del mineral y gestionar las emisiones de GEI asociadas.

Para el caso de las tecnologías CCUS se tenía previsto que el gobierno trabajara en diseñar mecanismos adicionales a los actualmente vigentes que permitan nivelar las condiciones del mercado de carbono ya sea a través de la internalización de los costos de emisiones o el beneficio e incentivo a las industrias que inviertan en la captura de CO<sub>2</sub> (Ministerio de Minas y Energía , 2021). En la actualidad, se cuenta con propuestas reglamentarias para la implementación de estas tecnologías, así como algunos lineamientos técnicos.

Otros instrumentos se relacionan con la expansión del parque de generación de energía eléctrica, y el rol que puede tener el esquema del cargo por confiabilidad, como habilitador para la implementación tecnológica que permita gestionar las emisiones de GEI a la vez que permite que el sistema eléctrico se expanda y cuente con las fuentes que permitan garantizar la confiabilidad, firmeza y flexibilidad que requiere el sistema, sobre todo frente a una mayor inserción de fuentes intermitentes (caso fuentes de energía renovable no convencional FNCER) y frente escenarios de electrificación de la economía, en donde se requerirá la energía suficiente y oportuna para atender las necesidades de la demanda eléctrica en los momentos pico.

Por su parte, se debe ampliar la capacidad del país para promover nuevas fuentes de financiamiento como lo son:

- Financiamiento climático, el cual busca reducir emisiones y mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero al tiempo que busca reducir la vulnerabilidad y mantener e incrementar la resiliencia de los sistemas humanos y ecológicos ante los efectos negativos del cambio climático (DNP, CDKN, E3, 2021).
- Financiamiento combinado, como alternativa para el uso estratégico de fondos destinados al desarrollo para lograr la movilización adicional de fuentes tradicionales, con el propósito de apoyar e incrementar la financiación disponible para proyectos que buscan el desarrollo sostenible. Esta es una herramienta que nace de la necesidad de juntar a los actores públicos y privados, para potencializar los recursos de inversión necesarios para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas climáticas. Adicionalmente, esta herramienta también puede contribuir a fortalecer los mercados locales y a diversificar la dependencia de sectores específicos, lo que genera economías más resilientes (DNP, CDKN, E3, 2021).



## 4. Recomendaciones y mensajes finales

Los incentivos y las señales de política son fundamentales para promover la adopción de mejores prácticas y tecnologías que permitan seguir aprovechando de manera responsable y sostenible los recursos energéticos abundantes con los que cuenta el país (caso carbón), esto, atendiendo los principios del trilema energético, con el fin de garantizar la soberanía y seguridad energética, la cobertura o igualdad energética y la sostenibilidad medio ambiental.

Para Colombia, como lecciones del Fenómeno de El Niño 2023-2024, es relevante resaltar el rol esencial del carbón como energético clave para garantizar la autosuficiencia energética y brindar disponibilidad de energía confiable, firme y oportuna, sobre todo en momentos de hidrología crítica en el país.

Es necesario que se promueva la investigación, la cooperación internacional y el desarrollo de pilotos, para la modernización y adopción tecnológica en el sector eléctrico, permitiendo que se perciban los beneficios para el sistema que aportan las centrales de generación termoeléctrica, incluyendo la confiabilidad y firmeza del sistema, ante escenarios de electrificación de la economía y una mayor inserción de fuentes intermitentes.

El gobierno nacional debe promover una transición energética basada en la tecnología, siendo un proceso seguro y gradual que prime sobre señales radicales, considerando la relevancia del encadenamiento productivo del carbón para Colombia en materia económica y social, por lo que se deben fomentar estrategias que permitan la adopción de prácticas y tecnologías más sostenibles y no restrictivas y que así la transición energética se acompañe con una transición fiscal y de empleo. En relación a lo anterior, es importante tener en cuenta políticas de otros países, caso Estados Unidos, que aplazó su meta sobre el tratamiento de las centrales eléctricas a carbón; ahora al 2038 se espera que estas centrales cuenten con tecnologías de CCS o que quemen mayoritariamente hidrógeno, posterior a esto quienes no cumplan, se verán forzadas a salir (Friedman, 2024).

Debe existir una apuesta decidida por parte del gobierno nacional para generar los mecanismos de colaboración entre los diferentes actores, empresa privada, inversionistas, comunidades, sector financiero, academia, para que la política pública respalte a través de la regulación, la financiación, los recursos, el desarrollo y fortalecimiento de los sectores productivos (en este caso la generación eléctrica) que jalonen el desarrollo del país. El carbón es y seguirá siendo un mineral fundamental para el desarrollo del país, aportando recursos para las regiones, oportunidad de empleo formal, impulsando un encadenamiento productivo que cada vez debe ser más sostenible y responsable.

Además, es importante, que la modernización del mercado de energía mayorista, contemple las particularidades operativas requeridas por las centrales de generación de energía, para que estas puedan implementar las nuevas tecnologías que les permitan gestionar las emisiones de GEI, y aportar todos sus atributos al Sistema Interconectado Nacional, para que de esta forma, las inversiones puedan ser realizadas, se remunere de manera adecuada la implementación tecnológica y la operación de las centrales sea lo más eficiente posible.

## Referencias

- › ACM. (2023). Estándar TSM. Obtenido de Minería Sostenible Colombia: <https://mineriasosteniblecolombia.com/>
- › ACM. (s.f.). Carbón Térmico. Obtenido de <https://acmineria.com.co/mineria/minerales/carbon-termico/>
- › Agencia Nacional de Minería. (2024). Carbón, el padrino minero de Colombia. Obtenido de [https://www.anm.gov.co/?q=carbon\\_el\\_padrino\\_minero\\_de\\_colombia\\_boletin\\_prensa](https://www.anm.gov.co/?q=carbon_el_padrino_minero_de_colombia_boletin_prensa)
- › ANDEG & SGC. (2022). Informe convenio entre Asociación Nacional de Empresas Generadoras -ANDEG y Servicio Geológico Colombiano – SGC. Ocurrencia de mercurio en el carbón.
- › ANDEG. (2023). 6 Informe de Sostenibilidad. Obtenido de <https://www.andeg.org/wp-content/uploads/2023/12/ANDEG-Informe-Sostenibilidad-2023-propuesta-ajustado.pdf>
- › Arbeláez, G. (2024). IMPORTANCIA DE LAS CENIZAS VOLANTES EN LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO. Obtenido de Argos - 360 en Concreto: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/importancia-de-las-cenizas-volantes-en-la-produccion-de-concreto/>
- › AreaCiencias. (2024). El Carbón. Obtenido de <https://www.areaciencias.com/geologia/carbon/>
- › BHP. (2024). Carbón metalúrgico. Obtenido de <https://www.bhp.com/es/what-we-do/products/metallurgical-coal>
- › CCUS Net Zero Colombia. (2024). ¿Sabes qué son las tecnologías CCUS? Obtenido de [https://www.linkedin.com/search/results/content/?fromMember=%5B%22ACoAAERIXjUB9u\\_BgK03GCAepvBNqWiGp-FeXUg%22%5D&heroEntityKey=urn%3Ali%3Afsd\\_profile%3AACoAAERIXjUB9u\\_BgK03GCAepvBNqWiGp-FeXUg&keywords=ccus%20netzero%20colombia&position=0&searchId=f0103bf9-](https://www.linkedin.com/search/results/content/?fromMember=%5B%22ACoAAERIXjUB9u_BgK03GCAepvBNqWiGp-FeXUg%22%5D&heroEntityKey=urn%3Ali%3Afsd_profile%3AACoAAERIXjUB9u_BgK03GCAepvBNqWiGp-FeXUg&keywords=ccus%20netzero%20colombia&position=0&searchId=f0103bf9-)
- › Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2011). Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias. Obtenido de <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/>
- › De Gracia, I. (2021). Simulación de una Central de Carbón e Hibridación con Tecnologías de Concentración Solar en Thermoflex. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproj/72193/fichero/TFM-2193+GRACIA+G%C3%93MEZ%2C+IRVING+DE.pdf>
- › DNP, CDKN, E3. (2021). Guía de Financiación Combinada para Colombia. Obtenido de [https://finanzasdelclima.dnp.gov.co/movilizacionrecursos/strumentos-economicos-financieros/Documentos%20compartidos/guia-de-financiacion-combinada-blended-finance-guide.pdf](https://finanzasdelclima.dnp.gov.co/movilizacionrecursos/instrumentos-economicos-financieros/Documentos%20compartidos/guia-de-financiacion-combinada-blended-finance-guide.pdf)

- › Enel. (2022). BESS Termozipa: el innovador proyecto de almacenamiento de energía de Enel Colombia. Obtenido de <https://www.enel.com.co/es/historias/a202203-almacenamiento-de-energia-en-bess-termozipa.html>
- › Fenalcarbón & ANDEG. (2024). Campaña de comunicación sobre la importancia del carbón. Obtenido de [https://twitter.com/Andeg\\_Col](https://twitter.com/Andeg_Col)
- › Fenalcarbón. (2024). INFORME DEL COMPORTAMIENTO DEL MERCADO DE LOS CARBONES Y EL COQUE: BALANCE DEL SECTOR EN 2023 Y PERSPECTIVAS PARA EL 2024. Obtenido de INFOCARBONES FENALCARBÓN.
- › Friedman, L. (2024). E.P.A. to Exempt Existing Gas Plants From Tough New Rules, for Now. Obtenido de The New York Times: [https://www.nytimes.com/2024/02/29/climate/e-pa-climate-power-plant-emissions.html?unlocked\\_article\\_code=1.cU0.atxz.q\\_k9Q4fPWMJg&smid=wa-share](https://www.nytimes.com/2024/02/29/climate/e-pa-climate-power-plant-emissions.html?unlocked_article_code=1.cU0.atxz.q_k9Q4fPWMJg&smid=wa-share)
- › Future Coal. (2024). HIGH EFFICIENCY LOW EMISSIONS (HELE). Obtenido de [https://www.futurecoal.org/sustainable-coal/high-efficiency-low-emissions-hele/#:~:text=In%20a%20HELE%20coal%20power,%2Dpressure%20\(LP\)%20turbines.](https://www.futurecoal.org/sustainable-coal/high-efficiency-low-emissions-hele/#:~:text=In%20a%20HELE%20coal%20power,%2Dpressure%20(LP)%20turbines.)
- › GAIA. (2024). Papel del CCUS en el logro del Net Zero. Obtenido de Workshop CCUS.
- › García, J. (2020). OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE CALDERAS DE LECHO FLUIDIZADO CIRCULANTE MEDIANTE REDES NEURONALES. Obtenido de Universidad de Pamplona: [http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5382/1/Garc%C3%A1Da\\_2020\\_TG.pdf](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5382/1/Garc%C3%A1Da_2020_TG.pdf)
- › GE Vernova. (2024). ULTRA-SUPERCritical AND ADVANCED SUPERCritical TECHNOLOGY. Obtenido de <https://www.ge.com/steam-power/coal-power-plant/usc-ausc>
- › Gecelca. (2022). Central Gecelca 3. Obtenido de <https://www.gecelca.com.co/unidad-de-negocios/generacion/>
- › Grupo Hidráulica. (2022). ¿Qué es la minería sostenible y cuáles son sus beneficios? Obtenido de <https://grupohidraulica.com/noticias/2022/08/15/que-es-mineria-sostenible-y-sus-beneficios/>
- › Huth, M., & Heilos, A. (2013). Fuel flexibility in gas turbine systems: impact on burner design and performance. Obtenido de Modern Gas Turbine Systems: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/integrated-gasification-combined-cycle-power-plant>
- › IEA. (2012). Technology Roadmap High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation. Obtenido de International Energy Agency: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/c43bc244-0050-45ec-807c-d870ae9241a7/TechnologyRoadmapHighEfficiencyLowEmissionsCoalFiredPowerGeneration\\_WEB\\_Updated\\_March2013.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/c43bc244-0050-45ec-807c-d870ae9241a7/TechnologyRoadmapHighEfficiencyLowEmissionsCoalFiredPowerGeneration_WEB_Updated_March2013.pdf)
- › IEA. (2020). CCUS in Clean Energy Transitions. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

- IEA. (2022). Key strategies to reduce emissions of existing coal-fired plants in the Announced Pledges Scenario, 2022-2050. Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/key-strategies-to-reduce-emissions-of-existing-coal-fired-plants-in-the-announced-pledges-scenario-2022-2050>
- IEA. (2023). Carbon Capture, Utilisation and Storage in Indonesia. Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e4db0b4f-4169-40f7-9cf2-1003bae7a962/CarbonCapture%2CUtilisationandStorageinIndonesia-Policybrief.pdf>
- IEA. (2023). CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/ccus-policies-and-business-models-building-a-commercial-market>
- IEA. (2023). Coal 2023. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/coal-2023>
- IEA. (2024). CCUS Projects Explorer. Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ccus-projects-explorer>
- John T. Boyd Company. (2023). Panel interactivo de carbón. Obtenido de <https://www.jtboyd.com/spanish2/interactive-coal-board.php>
- Kumar, D., & Kumar, D. (2018). Coal Usage and Control of CO<sub>2</sub> Emissions. Obtenido de Sustainable Management of Coal Preparation: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/integrated-gasification-combined-cycle-power-plant>
- Ministerio de Minas y Energía . (2021). Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia. Obtenido de [https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja\\_Ruta\\_Hidrogeno\\_Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía. (2019). Sector Carbón.
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). MINERÍA DE CARBÓN EN COLOMBIA, TRANSFORMANDO EL FUTURO DE LA INDUSTRIA. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/statc/mineriaco/src/document/documento%20carbon.pdf>
- National Energy Technology Laboratory. (2022). COST AND PERFORMANCE BASELINE FOR FOSSIL ENERGY PLANTS VOLUME 1: BITUMINOUS COAL AND NATURAL GAS TO ELECTRICITY . Obtenido de [https://netl.doe.gov/projects/files/CostAndPerformanceBaselineForFossilEnergyPlantsVolume1BituminousCoalAndNaturalGasToElectricity\\_101422.pdf](https://netl.doe.gov/projects/files/CostAndPerformanceBaselineForFossilEnergyPlantsVolume1BituminousCoalAndNaturalGasToElectricity_101422.pdf)
- Pérez, A. (2014). Modelización de una central térmica supercrítica de 700 MW con capta de CO<sub>2</sub>. Obtenido de Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía (Universidad Politécnica de Madrid): [https://oa.upm.es/32722/1/PFC\\_Alejandro\\_Miguel\\_Perez.pdf](https://oa.upm.es/32722/1/PFC_Alejandro_Miguel_Perez.pdf)
- Power Technology. (2020). Yuhuan 1,000MW Ultra-Supercritical Pressure Boilers. Obtenido de <https://www.power-technology.com/projects/yuhuancoal/?cf-view=1>

- Renewable Energy Magazine. (2024). hidrógeno. Obtenido de [https://www.energias-renovables.com/hidrogeno/20201214#:~:tex](https://www.energias-renovables.com/hidrogeno/20201214#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20negro%20o%20marr%C3%B3n,tambi%C3%A9n%20genera%20emisiones%20de%20CO2)  
t=El%20hidr%C3%B3geno%20negro%20o%20marr%C3%B3n,tambi%C3%A9n%20genera%20emisiones%20de%20CO2.
- Roussanaly, S., Vitvarova, M., Anantharamana, R., Berstad, D., Hagen, B., Jakobsen, J., ... Skaugen, G. (2019). Techno-economic comparison of three technologies for pre-combustion CO<sub>2</sub> capture from a lignite-fired IGCC . Obtenido de Frontier in Chemical Engineering: [https://www.researchgate.net/publication/336816831\\_Techno-economic\\_comparison\\_of\\_three\\_technologies\\_for\\_precombustion\\_CO2\\_capture\\_from\\_a\\_lignite-fired\\_IGCC/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJIY3QiLCJwYWdIjoiX2RpcmVjdCJ9fQ](https://www.researchgate.net/publication/336816831_Techno-economic_comparison_of_three_technologies_for_precombustion_CO2_capture_from_a_lignite-fired_IGCC/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJIY3QiLCJwYWdIjoiX2RpcmVjdCJ9fQ)
- Sask Power. (2021). Leveraging Saskatchewan's Energy Transition . Obtenido de Presentación realizada a ANDEG.
- Tecnigrado. (2022). Diferencias y similitudes entre calderas supercríticas y subcríticas. Obtenido de <https://www.tecnigrado.com/calderas-supercriticas-subcriticas/#:~:text=Las%20calderas%20supercr%C3%ADticas%20o%20subcr%C3%ADticas,supercr%C3%ADticas%20funcionan%20a%20presiones%20supercr%C3%ADticas>.
- Universidad de Guanajuato. (2021). Ciclos termodinámicos para centrales termoeléctricas. Obtenido de <https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-9-ciclos-termodinamicos-para-centrales-termoelectricas/>
- UPME. (1998). GUÍA AMBIENTAL PROYECTOS CARBOELÉCTRICOS. Obtenido de - [http://www.upme.gov.co/guia\\_ambiental/carbon/gestion/-guias/plantas/contenido/analisis.htm](http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/-guias/plantas/contenido/analisis.htm)
- UPME. (s.f.). La Cadena del Carbón . Obtenido de El carbón colombiano, fuente de energía para el mundo: [http://www.upme.gov.co/docs/cadena\\_carbon.pdf](http://www.upme.gov.co/docs/cadena_carbon.pdf) -
- World Coal Association. (2021). Clean Coal Technology in ASEAN. Obtenido de Balancing Equity, Security & Sustainability: [https://mcusercontent.com/c35475364a541a1bdee7dc50b/fiiles/41eab407-db3a-900c-6656-f47dd2cec035/WCA\\_ACE\\_Clean\\_Coal\\_Technology\\_in\\_AS\\_EAN\\_Report.pdf](https://mcusercontent.com/c35475364a541a1bdee7dc50b/fiiles/41eab407-db3a-900c-6656-f47dd2cec035/WCA_ACE_Clean_Coal_Technology_in_AS_EAN_Report.pdf)
- Zhu, Y., & Frey, H. i. (2012). Integrated gasification combined cycle (IGCC) systems. Obtenido de Combined Cycle Systems for Near-Zero Emission Power Generation, : - <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/integrated-gasification-combined-cycle-plant>

