

+ Hydrogen

+

H₂

+

Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia



+

+

+



Índice

PRÓLOGO	3
1. EL HIDRÓGENO Y LA OPORTUNIDAD PARA COLOMBIA	5
1.1. El hidrógeno en el marco de la descarbonización global	5
1.2. Fortalezas de Colombia en materia de hidrógeno	8
2. COMPETITIVIDAD DEL HIDRÓGENO NACIONAL	12
2.1. Producción de hidrógeno azul	12
2.2. Producción de hidrógeno verde	13
2.3. Evolución del hidrógeno de bajas emisiones en Colombia	16
3. DEMANDA NACIONAL Y EXPORTACIÓN DE HIDRÓGENO Y DERIVADOS	18
3.1. Demanda esperada de hidrógeno y derivados de bajas emisiones	18
3.2. Abatimiento de emisiones asociadas al uso de hidrógeno	21
3.3. Potencial de exportación	22
4. HORIZONTE 2030 Y 2050	24
4.1. Pilares de la Hoja de Ruta	24
4.2. Metas a 2030	26
4.3. Ambición a 2050	27
5. NUESTRO COMPROMISO ENMARCADO EN 4 EJES	28
5.1. Mapa de actuación	28
5.2. Habilitadores regulatorios	29
5.3. Instrumentos de desarrollo de mercado	36
5.4. Apoyo al despliegue de infraestructura	41
5.5. Impulso al desarrollo tecnológico	46
ANEXO I. PLAN DE SOCIALIZACIÓN	50
ANEXO II. GOBERNANZA	52

Lista de figuras

Figura 1: Demanda global de hidrógeno.....	7
Figura 2: LCOH gris y azul a partir de gas natural y carbón	12
Figura 3: Separación de Colombia por zonas de recurso renovable	14
Figura 4: LCOH verde con factor de capacidad renovable moda en las distintas regiones	15
Figura 5: LCOH verde según factores de capacidad renovable moda y máximo.....	15
Figura 6: Comparativa del LCOH según las rutas de producción.....	16
Figura 7: Competitividad de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia	17
Figura 8: Principales aplicaciones actuales y futuras del hidrógeno	18
Figura 9: Evolución prevista de la nueva demanda de hidrógeno y derivados de bajas emisiones	19
Figura 10: Nueva demanda de hidrógeno y derivados de bajas emisiones en Colombia.....	20
Figura 11: Desarrollo de las aplicaciones de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia	20
Figura 12: Reducción de emisiones en Colombia por consumo de H ₂ en cada sector	22
Figura 13: Principales focos de demanda de hidrógeno a nivel global	23
Figura 14: Pilares de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia	24
Figura 15: Metas de país en materia de hidrógeno a 2030	26
Figura 16: Estrategia nacional a 2050 en materia de hidrógeno de bajas emisiones	27
Figura 17: Ejes de actuación de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia	28
Figura 18: Líneas de trabajo para el desarrollo del hidrógeno	29
Figura 19: Plan de socialización de la Hoja de Ruta del Hidrógeno	50
Figura 20: Modelo de Gobierno de la Hoja de Ruta del Hidrógeno.....	52

Prólogo

La Hoja de Ruta del Hidrógeno tiene por objeto contribuir al desarrollo e implantación del hidrógeno de bajas emisiones en Colombia reforzando así el compromiso del Gobierno con la reducción de emisiones estipulada en los objetivos del Acuerdo de París del 2015. Para la elaboración de esta Hoja de Ruta, el Gobierno Colombiano cuenta con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) a través de su División de Energía y su División de Cambio Climático y Sostenibilidad.

La Hoja de Ruta toma como punto de partida los análisis realizados sobre la capacidad de producción de hidrógeno, su demanda esperada, la reducción de emisiones asociada, el potencial exportador del país y las medidas regulatorias necesarias para implementar un plan de despliegue del hidrógeno en Colombia.

El hidrógeno está suscitando un gran interés como instrumento clave dentro del proceso de transición energética. El hidrógeno es el elemento más sencillo y ligero de la tabla periódica y su versatilidad como materia prima industrial, combustible y vector energético para el almacenamiento y transporte de energía, permite un gran número de aplicaciones, algunas de las cuales no se han desarrollado completamente aún. Asimismo, el hidrógeno no tiene emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) directas durante su uso final ni prácticamente ninguna otra emisión contaminante. Dada su reactividad, el hidrógeno no suele presentarse aisladamente en la naturaleza teniendo que extraerse a partir de agua, hidrocarburos o biomasa. En función del proceso de producción del hidrógeno y de la fuente de energía empleada, variarán las emisiones de CO₂ asociadas. La utilización de energías renovables o la captura del CO₂ emitido cuando se utilizan combustibles fósiles en su producción convierten al hidrógeno en una alternativa para la descarbonización de múltiples usos finales, siendo tanto más interesante cuanto más compleja sea la electrificación de estos.

El hidrógeno de bajas emisiones contribuirá a acelerar la consecución de los objetivos de la estrategia de descarbonización de Colombia. Como vector energético, el hidrógeno acelerará el despliegue de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), como la energía solar y eólica, mediante el almacenamiento estacional de energía y su transporte a los centros de demanda. Colombia cuenta con una matriz energética altamente descarbonizada y con recursos renovables para la producción de hidrógeno verde con costos competitivos. Además, Colombia dispone de gas y carbón que, combinados con captura y almacenamiento o utilización de CO₂, diversifican las opciones de suministro de hidrógeno de bajas emisiones asegurando el autoabastecimiento.

En el sector industrial, el hidrógeno reemplazará progresivamente el uso de combustibles y materias primas de origen fósil en las industrias para las que hoy existen pocas alternativas de bajas emisiones. Asimismo, el hidrógeno proporciona una alternativa para aquellos modos de transporte de difícil electrificación. Actualmente, el hidrógeno de bajas emisiones debe hacer frente inicialmente a una brecha de costo respecto del hidrógeno gris y los combustibles convencionales. Sin embargo, el hidrógeno de bajas emisiones permitiría mantener la autosuficiencia actual en materia energética y evitar, en el futuro, la dependencia de energéticos importados facilitando, en el largo plazo, un desarrollo industrial basado en la creación de nuevas cadenas de valor de productos de bajas emisiones.

Colombia dispone de las condiciones para aprovechar la oportunidad del hidrógeno y convertirse en líder regional de la transición energética gracias a su privilegiada ubicación geográfica y a un marco regulatorio y político estable, capaz de atraer inversiones a largo plazo. El desarrollo de la producción de hidrógeno y la adaptación de los sectores económicos para su uso requerirán grandes inversiones destinadas al desarrollo de tecnología y la creación de infraestructuras. Colombia, al igual que las principales economías mundiales, ha creado planes de inversión e

incentivos para desarrollar cadenas de valor completas en torno al hidrógeno de bajas emisiones. Estos planes se combinan con una serie de desarrollos regulatorios, una política de investigación y desarrollo (I+D) alineada con una política industrial y la creación de mercados que incentiven el uso de hidrógeno. Colombia acelerará la adquisición de capacidades nacionales y se posicionará a nivel global en este mercado emergente a través de acuerdos de cooperación para el acceso a nuevas tecnologías, la financiación de proyectos y la apertura de rutas para la exportación de hidrógeno y derivados.

1. El hidrógeno y la oportunidad para Colombia

1.1. El hidrógeno en el marco de la descarbonización global

La lucha contra el calentamiento global ocasionado por la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se ha convertido en una prioridad internacional. El Acuerdo de París de 2015 recoge la necesidad de mantener el aumento de la temperatura media del planeta por debajo de los 2°C, con una recomendación prioritaria a trabajar para que la temperatura no aumente por encima de los 1,5°C. En este sentido, la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia compromete una reducción de emisiones del 51% en 2030 respecto al escenario de referencia con el objetivo de alcanzar la carbono-neutralidad hacia mediados de siglo.

En este contexto, el hidrógeno es una herramienta para la consecución de estos objetivos cuyo papel será clave en el largo plazo para descarbonizar ciertos sectores de difícil electrificación. Esta situación es similar a la de otras economías, por lo que el hidrógeno de bajas emisiones dará lugar a un mercado global donde Colombia jugará un papel destacado.

El auge del hidrógeno a nivel mundial se debe a su gran versatilidad. El hidrógeno es el elemento más simple de la tabla periódica y enormemente reactivo, por lo que no se encuentra normalmente libre en la naturaleza sino combinado con otras moléculas. Esto hace que el hidrógeno no sea una fuente de energía sino un vector energético, dado que debe usarse energía para su producción¹.

Actualmente existen diversas formas de producir hidrógeno caracterizándose por los insumos utilizados y las tecnologías empleadas. El hidrógeno puede clasificarse según la sostenibilidad del vector energético que depende en gran medida de la tecnología de producción y la fuente de energía. De este modo la clasificación se hace en función de las emisiones que lleva asociadas. La Comisión Europea ha adoptado esta clasificación en su estrategia para el hidrógeno²:

- **Hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles**, producido mediante procesos que usan un combustible fósil como materia prima, como por ejemplo el reformado del gas natural o la gasificación del carbón, con factores de emisión de 9,5 kgCO₂/kgH₂³ para el gas natural, y de 20 kgCO₂eq/kgH₂ para el carbón.
- **Hidrógeno a partir de combustibles fósiles con CCUS**, subcategoría de la categoría anterior, que utiliza la captura, almacenamiento y en algunos casos utilización de carbono (CCUS⁴), con factores de emisión que pueden oscilar entre 1 y 2 kgCO₂/kgH₂⁵.
- **Hidrógeno a partir de electricidad**, producido mediante electrolisis, independientemente del origen de la energía eléctrica. En consecuencia, la sostenibilidad de este hidrógeno depende de la composición del parque de generación eléctrica. Si en Europa el factor de emisión promedio sería de 14 kgCO₂/kgH₂, a nivel mundial ese valor subiría hasta los 26 kgCO₂/kgH₂², mientras que en Australia podría alcanzar los 54 kgCO₂/kgH₂⁶. Hay que subrayar que estos valores son superiores al factor de emisión del reformado con vapor del metano (SMR) de 9,5 kgCO₂/kgH₂. No obstante, Colombia consigue un factor de emisión

¹ Vector energético: en este caso, sustancia que almacena energía, de tal manera que ésta pueda liberarse posteriormente de forma controlada y en el momento requerido. A diferencia de las fuentes primarias de energía, se trata de productos manufacturados, en los que previamente se ha invertido una cantidad de energía para su elaboración que es mayor a la almacenada.

² Comisión Europea (2020): A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe

³ IRENA (2019): Hydrogen: A Renewable Energy Perspective

⁴ Del inglés "Carbon Capture, Utilization and Storage"

⁵ CE, Comisión Europea, (2020). A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe.

⁶ Barnes, A., Yafimava, K., (2020): EU Hydrogen Vision

inferior por su mix energético con alta presencia hidráulica. En el caso de Colombia, la producción de hidrógeno a partir de la red emitiría 8,2 kgCO₂/kgH₂⁷.

- **Hidrógeno renovable (o hidrógeno limpio)**, producido a partir de fuentes renovables por lo que se considera que tiene emisiones prácticamente nulas⁸. Esta categoría incluye al hidrógeno producido mediante electrolisis, siempre que la electricidad provenga de tecnologías renovables, y al biohidrógeno, obtenido a partir de la biomasa.
- **Hidrógeno de bajas emisiones**, puede incluir tanto el hidrógeno a partir de combustibles fósiles con CCUS como el hidrógeno a partir de electricidad entre otros, siempre que sus factores de emisión sean sustancialmente inferiores a los de las formas de producción actuales⁹.

En los últimos años, se ha venido utilizando y desarrollando un código de colores que simplifica la clasificación del hidrógeno según la fuente de energía que se usa para producirlo y, a veces, también según el proceso de producción. Esta última clasificación será la utilizada a lo largo del presente documento para diferenciar entre las distintas vías de producción de hidrógeno en Colombia. Los tipos de hidrógeno mencionados son:

- **Hidrógeno gris**, producido a partir de combustibles fósiles, principalmente gas natural y carbón, sin subsecuente captura y almacenamiento de carbono.
- **Hidrógeno azul**, se denomina hidrógeno azul al producido a partir de fuentes fósiles que incorporan captura y almacenamiento de emisiones de CO₂. La Ley de Transición Energética define como hidrógeno azul al que se produce a partir de combustibles fósiles, especialmente por la descomposición del metano (CH₄) y que cuenta con un sistema de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS), como parte de su proceso de producción. El hidrógeno azul se incluye dentro de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE).
- **Hidrógeno verde**, se corresponde con el hidrógeno renovable. De acuerdo con el artículo 5 de la Ley de Transición energética 2099 de 2021 de Colombia, se define como hidrógeno verde al hidrógeno producido a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, el calor geotérmico, la solar, los mareomotriz, entre otros.

El papel del hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados en la descarbonización de múltiples sectores ha despertado el interés de las principales economías y ha propiciado el desarrollo de proyectos, iniciativas y estrategias públicas de impulso al despliegue del hidrógeno entre las que se enmarca la presente Hoja de Ruta. Los recursos naturales de cada país y los objetivos de descarbonización marcados definirán normalmente el tipo de hidrógeno de bajas emisiones a potenciar.

Actualmente 30 países han desarrollado sus propias hojas de ruta del hidrógeno o planes energéticos en los cuales el hidrógeno juega un papel clave en sus estrategias de reducción de emisiones. La estrategia de la Comisión Europea resulta especialmente ambiciosa y considera movilizar entre 180 y 470 billones de euros de financiación público-privada abarcando desde la investigación y desarrollo de tecnologías hasta incentivos para la instalación de plantas de generación de hidrógeno verde. Las rutas de hidrógeno de bajas emisiones de origen fósil tendrán un presupuesto menor de entre 3 y 18 billones de euros. Adicionalmente los diferentes estados miembros también proporcionarán sus propios incentivos donde destacan Alemania con un programa de apoyo público de 9 billones de euros (2 billones de euros se destinarán a acuerdos

⁷XM(2019): Factor de emisión de la red eléctrica en Colombia 164,38 gCO₂/kWh; IEA (2019), *The Future of Hydrogen: eficiencia en la producción de H₂ de 50 kWh/kgH₂*

⁸ Se consideran sólo las emisiones debidas a la producción y uso del hidrógeno.

⁹ El sistema de medida y los umbrales máximos de emisiones están en proceso de definición a nivel internacional. En el presente documento se considera hidrógeno de bajas emisiones al hidrógeno azul y verde.

internacionales) o Francia con 9 billones de euros. Otras grandes economías como Japón o Corea del Sur también destinarán 19 y 2,4 billones de dólares respectivamente para la financiación de proyectos relacionados con la economía del hidrógeno.

El interés en el desarrollo de proyectos de hidrógeno renovable en el ámbito privado también se ha acelerado de forma muy importante. A febrero de 2021 se habían anunciado internacionalmente 228 proyectos relacionados con hidrógeno en toda su cadena de valor, de los cuales 17 correspondían a proyectos de producción con una escala superior al gigavatio (más de 1 GW de potencia renovable o 200.000 toneladas/año de producción de hidrógeno de bajas emisiones). Europa concentra el 55% de los proyectos seguida por Australia, Japón y Corea del Sur¹⁰. El renovado interés en el hidrógeno se explica principalmente por la necesidad de acelerar el proceso de descarbonización global, las rápidas reducciones en el costo de la energía renovable, la evolución de tecnologías clave en la cadena de valor del hidrógeno y el apoyo público a la transición energética que se ha visto incrementado como parte de la estrategia de recuperación económica tras la pandemia del COVID-19.

Por tanto, a nivel global, se espera un rápido crecimiento de la demanda actual de hidrógeno puro desde 75 Mt en 2019¹¹, fundamentalmente hidrógeno gris, a más de 800 Mt en 2050 en los escenarios más optimistas, gracias al desarrollo de alternativas de producción de bajas emisiones¹².

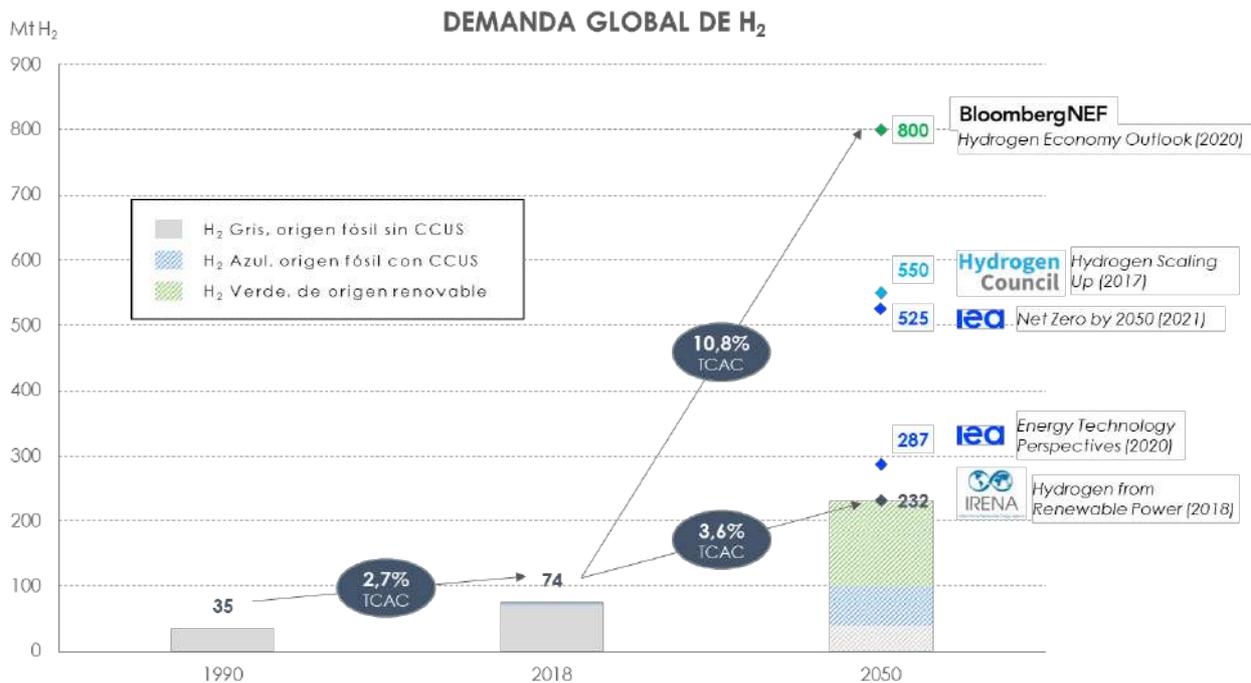


Figura 1: Demanda global de hidrógeno¹³

La nueva demanda global se deberá principalmente a los potenciales nuevos usos del hidrógeno. En el sector del transporte, el hidrógeno surge como una alternativa para sustituir a los combustibles fósiles proporcionando ventajas relevantes en cuanto a autonomía y tiempos de repostaje comparado con los vehículos eléctricos de batería. De la misma manera, para reducir la huella de CO₂ de procesos industriales, el hidrógeno de bajas emisiones sustituirá a los combustibles fósiles en la provisión de calor industrial de alta temperatura y como materia prima en algunos procesos, como la refinación, la producción de acero y otros usos industriales menores (industria química,

¹⁰ Fuente. Hydrogen Council (2021): Hydrogen Insights

¹¹ Energy Technology Perspectives, IEA (2020).

¹² Escenario NEO Climate Scenario en BloombergNEF (2020): Hydrogen Economy Outlook

¹³ TCAC: Tasa de Crecimiento Anual Compuesta

producción de vidrio, procesado de grasas y aceites, fabricación de explosivos para minería, etc.). En el sector eléctrico, el hidrógeno facilitará una mejor integración de las energías renovables no convencionales y habilitará el almacenamiento estacional de energía necesario, reduciendo así el impacto de la variabilidad en la generación de electricidad con fuentes renovables no gestionables. Por último, el hidrógeno puede sustituir a los combustibles fósiles que se utilizan para proveer calefacción y agua caliente en los edificios tanto del sector residencial como comercial. En todas estas aplicaciones, el hidrógeno será una alternativa de bajas emisiones si se produce con una reducida huella de CO₂, contribuyendo a alcanzar varios de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la ONU: 7 – Energía asequible y no contaminante, 8 – Trabajo decente y crecimiento económico, 9 – Industria, innovación e infraestructura, 11 – Ciudades y comunidades sostenibles, 12 – Producción y consumo responsable, 13 – Acción por el clima, y 17 – Alianzas para lograr objetivos.

El hidrógeno se puede transformar en otras sustancias que pueden tener aplicaciones directas en industria o movilidad o ser consideradas portadores alternativos de energía tales como amoníaco, metanol y otros derivados como combustibles sintéticos o líquidos orgánicos portadores de hidrógeno, cuyo almacenamiento y transporte resulta más sencillo y son compatibles con la infraestructura existente.

El amoníaco representa el 27% del consumo de hidrógeno en la actualidad¹⁴, siendo sus aplicaciones más importantes la producción de fertilizantes y su uso en industria química. Se espera un crecimiento anual del 1,5% hasta 2030 derivado de la creciente demanda de fertilizantes por el aumento de la población, aunque se proyectan nuevos usos adicionales para el amoníaco de bajas emisiones como combustible marítimo o en generación eléctrica.

Por otro lado, la producción de metanol consume el 11% del hidrógeno a nivel mundial¹⁵. El metanol se utiliza en la fabricación de productos químicos y como combustible para el transporte. La tasa de crecimiento esperada para la demanda de metanol es del 3,6% anual hasta 2030.

Al igual que otras geografías, Colombia considera que el hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados serán una pieza fundamental en el cumplimiento de sus objetivos de descarbonización y actuarán como un nuevo motor económico del país. La consecución de dichas metas se apalancará sobre las capacidades diferenciales de Colombia que abarcan desde el aprovechamiento sostenible de sus recursos naturales a la existencia de un marco regulatorio y normativo estable y comprometido con la descarbonización.

1.2. Fortalezas de Colombia en materia de hidrógeno

1.2.1. Recursos naturales abundantes para la producción de H₂ de bajas emisiones

Colombia es un país privilegiado en cuanto a la diversidad y disponibilidad de recursos naturales que cubren sus necesidades energéticas actuales y que sientan las bases para la producción futura de hidrógeno de bajas emisiones.

En primer lugar, Colombia cuenta con importantes reservas de petróleo, gas natural y carbón que le proporcionan una posición cercana a la autosuficiencia en combustibles y que podrían utilizarse para la producción de hidrógeno azul mediante la captura almacenamiento y/o utilización de las emisiones de CO₂ generadas.

¹⁴ IEA (2019): *The Future of Hydrogen, considerando tanto hidrógeno puro como en mezcla, es decir 110Mt de demanda total.*

¹⁵ IEA (2019): *The Future of Hydrogen*

Las reservas de gas natural se estiman en alrededor de 2.949 Gpc (7,7 años)¹⁶ estando los principales campos de producción en los Llanos Orientales, el Valle Inferior del Magdalena y La Guajira. Además, Colombia puede importar gas natural a través del puerto de Cartagena y próximamente entrará en operación una segunda planta en el puerto de Buenaventura asegurando de esta manera el suministro para el país en el largo plazo. Con respecto al carbón, Colombia es el mayor productor de Latinoamérica y uno de los principales exportadores a nivel mundial. Las reservas probadas de carbón superan las 4.500 Mt¹⁷, suficientes para abastecer el país durante más de 50 años, y se encuentran ubicadas principalmente en los departamentos de La Guajira, Cesar, y algunas zonas del centro del país. Considerando la producción anual de ambos energéticos, Colombia podría abastecer con holgura la demanda nacional de hidrógeno de bajas emisiones tanto a medio como a largo plazo, siendo las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ el aspecto a desarrollar en los próximos años para poder explotar estos recursos existentes. Además, se está evaluando la posibilidad de explotar yacimientos de hidrógeno natural, aunque la determinación de su localización y de su potencial se encuentra en un estado muy incipiente.

En segundo lugar, Colombia dispone de recursos para la generación renovable equiparables a los de las mejores zonas a nivel mundial. Por un lado, su oferta hídrica es seis veces el promedio mundial y tres veces el de Latinoamérica. Su orografía y régimen pluviométrico presenta condiciones óptimas para la generación hidroeléctrica en gran parte del territorio nacional llegando a suponer el 70% de la generación eléctrica del país.

Por otro lado, el gran potencial eólico del norte del país y un atractivo potencial solar en gran parte del territorio, unidos al importante descenso de los costos de las tecnologías renovables no convencionales, permitirán un rápido despliegue de FNCER. La participación de las fuentes no convencionales de energía renovable en la matriz eléctrica colombiana, inferior al 1% en 2018, aumentará a más del 12% para el 2022, alcanzando los 2.800 MW instalados. En especial, algunas zonas costeras del norte del país como La Guajira, Magdalena, o Atlántico poseen una combinación de recurso renovable que asegura una producción competitiva de hidrógeno verde. En primer lugar, el recurso eólico en la costa es comparable en intensidad y constancia al obtenible en condiciones "offshore" con factores de planta que superan el 60%. El recurso solar también es abundante en estas regiones donde las instalaciones de tecnología solar fotovoltaica alcanzan factores de planta superiores al 19-20%. Estas condiciones posibilitarán costos de producción de hidrógeno verde similares a los obtenidos a partir de fuentes fósiles desde finales de la presente década y que resultarán competitivos a nivel global.

1.2.2. Posicionamiento geográfico estratégico e infraestructura

Colombia se encuentra ubicada en un enclave geográfico estratégico. Colombia es el nexo de unión entre América Central y América de Sur estando unido mediante redes de transporte, distribución y comercio con otros cinco países. Presenta una red eléctrica interconectada con países vecinos que se extenderá en la próxima década con una interconexión adicional con Ecuador y una nueva línea con Panamá. Colombia presenta también una red de gaseoductos de transporte de gas natural de más de 7500 km de longitud y una red de distribución que abastece una demanda nacional de 911 MPCD¹⁸. Esta red podría ser reacondicionada si fuera necesario para el transporte y distribución de hidrógeno en los tramos que conecten los centros de producción y demanda.

Además, Colombia se halla entre dos océanos, posición que la sitúa como nodo de comercio marítimo y exportación. Colombia cuenta con 10 zonas portuarias siendo Cartagena en el Caribe y Buenaventura en el Pacífico, los puertos de mayor relevancia. La gran mayoría de los puertos

¹⁶ Ministerio de Minas y Energía (2021)

¹⁷ Agencia Nacional de Minería (2021)

¹⁸ CREG (2019), Selección gestor de mercado de gas

cuentan con una infraestructura desarrollada para la importación/exportación de crudo y gas que puede reacondicionarse para el transporte y almacenamiento de hidrógeno y derivados.

Por todo ello, Colombia podría convertirse en un hub logístico de hidrógeno abasteciendo a los países cercanos tanto por mar como por tierra. Además, los costos competitivos esperados para el hidrógeno de bajas emisiones en Colombia favorecerán la exportación impulsando a su vez el comercio de otros productos en toda la cadena de valor del hidrógeno.

1.2.3. Un ecosistema empresarial sólido e innovador

Colombia cuenta con un tejido empresarial dinámico y emprendedor con amplia experiencia en la industria minera, producción de petróleo y gas, refinación de combustibles, generación de energía y en el manejo y transporte de gases. Este conocimiento y el aprovechamiento de la infraestructura industrial existente son un excelente punto de partida para acelerar el desarrollo de la producción de hidrógeno. Sin embargo, la industria colombiana es mucho más amplia y diversificada por lo que se postula como un actor clave a lo largo de toda la cadena de valor. En el futuro, el tejido empresarial colombiano ambiciona maximizar la captura de valor extendiendo y diversificando sus actividades mediante la producción de equipos y tecnologías claves en la cadena de valor del hidrógeno, así como participando en el desarrollo y operación de proyectos. Además, se fomentará el aprovechamiento del hidrógeno para la obtención de productos de bajas emisiones a través de la industria transformadora.

En este sentido, se ha constituido la Asociación Colombiana del Hidrógeno que reúne a socios del ámbito empresarial interesados en promover el desarrollo nacional de la industria del hidrógeno. El crecimiento y la consolidación de este tipo de asociaciones generarán sinergias entre empresas con el objetivo de desarrollar proyectos que combinen producción y demanda y dará cabida a nuevas oportunidades de negocio y de innovación.

El ecosistema innovador colombiano se sustentará también en la academia y universidades para las actividades de investigación en nuevas tecnologías y la formación de los profesionales.

1.2.4. Contexto político-regulatorio estable y propicio para el desarrollo de proyectos de hidrógeno

El Gobierno Nacional está completamente comprometido con la descarbonización de la economía. En primer lugar, desde la presidencia de la República y el ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible se anunció en noviembre de 2020 la meta de reducción del 51% de las emisiones de gases efecto invernadero del país para el año 2030. Este compromiso se refleja en la Estrategia 2050 de Colombia, en la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del sector minero energético y en el proceso de actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia, conocida como NDC, donde se establecen acciones ambiciosas para enfrentar los efectos del cambio climático de cara a los próximos 10 años¹⁹. En este sentido, además del actual impuesto al carbono y el sistema de compensaciones, se está evaluando la puesta en marcha de distintos mecanismos, como un sistema de cupos transables de emisión, para incentivar el uso de fuentes de energía más sostenibles. Se espera que el sistema incorpore adecuadas señales económicas para la transición de la demanda actual de hidrógeno hacia las distintas formas de producción de bajas emisiones y abrirá la puerta a la sustitución de energéticos fósiles por hidrógeno en nuevas aplicaciones apuntalando una nueva demanda.

Los excelentes recursos naturales colombianos le permitirán competir con otros países en el futuro mercado del hidrógeno de bajas emisiones. Sin embargo, para posicionarse en este mercado, Colombia deberá atraer recursos financieros nacionales e internacionales para desarrollar los

¹⁹ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020)

primeros proyectos comerciales tanto a nivel de producción como de demanda local. En línea con los resultados obtenidos con la promoción de proyectos de energías renovables no convencionales, el Gobierno de Colombia ha incluido al hidrógeno de bajas emisiones, que engloba tanto hidrógeno verde como azul, dentro de la Ley de Transición Energética 2099 de 2021 al considerarlo una pieza clave dentro de la estrategia de descarbonización.

Por tanto, se espera un ulterior impulso al desarrollo de proyectos de generación renovable para la producción de hidrógeno verde, siguiendo la tendencia iniciada en 2014 por la aprobación de la Ley 1715 y la organización de subastas de energías renovables no convencionales que han acelerado la participación de FNCER en la matriz energética colombiana.

Por otro lado, el apoyo al hidrógeno de bajas emisiones del Gobierno Nacional también comprenderá la actividad minera y gasista del país a través de la exploración y explotación de recursos críticos en la cadena de valor del hidrógeno de bajas emisiones. Se promoverá una transición justa mediante la reconversión de proyectos de minería e hidrocarburos para la generación de hidrógeno de bajas emisiones que incluyan la captura, almacenamiento y potencial valorización del CO₂.

La implementación de la hoja de ruta del hidrógeno de bajas emisiones en Colombia requerirá de un importante esfuerzo de inversión público-privado para el desarrollo de infraestructuras de producción, transporte y usos finales de hidrógeno de bajas emisiones y por tanto se ha establecido un marco de mecanismos de apoyo atractivo, estable y predecible que proporcione las garantías adecuadas para los inversionistas.

Con el objetivo de incentivar el desarrollo de proyectos competitivos de hidrógeno y facilitar la búsqueda de acuerdos internacionales que atraigan la inversión y las capacidades tecnológicas necesarias, la Ley 2099 de Transición Energética de 10 de Julio de 2021 fija un marco fiscal ventajoso para la inversión en fuentes no convencionales de energía contribuyendo a la recuperación de la economía. El hidrógeno verde y azul juegan un papel central en la misma al ser considerados como FNCER y FNCE respectivamente y a ambos les serán aplicados los beneficios de la Ley 1715 de 2014 durante un periodo de 30 años. La exención de pago de derechos arancelarios, la exclusión del IVA, la depreciación acelerada y la deducción del impuesto de la renta del 50% de la inversión, son poderosos instrumentos de apoyo para garantizar la competitividad de los proyectos de hidrógeno de bajas emisiones y proporcionan seguridad a los inversionistas.

A nivel de inversión directa, la Ley 2099 extiende el ámbito de actuación del Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) a la financiación y/o ejecución de proyectos viables en cualquier eslabón de la cadena del valor del hidrógeno de bajas emisiones. Dichas inversiones se priorizarán de acuerdo con su impacto en la reducción de emisiones en línea con los objetivos marcados y la creación de riqueza y puestos de trabajo.

Los beneficios, incentivos e inversiones previstos en la Ley 2099 suponen un poderoso gesto de apoyo y compromiso de Colombia con el despliegue del hidrógeno de bajas emisiones, posicionándola como un país de referencia en los futuros mercados de este nuevo vector energético.

2. Competitividad del hidrógeno nacional

El Gobierno de Colombia tiene un compromiso claro con la descarbonización de su matriz energética a la vez que promueve la sostenibilidad y competitividad a largo plazo de las capacidades productivas del país. En este sentido, el hidrógeno de bajas emisiones es una palanca para una transición paulatina y justa hacia una economía carbono neutral: en primer lugar, permite el reemplazo progresivo de los combustibles fósiles en aquellos sectores donde su sustitución por otros energéticos de bajas emisiones resulta especialmente compleja. Por otro lado, fomenta el desarrollo de una nueva cadena de valor que incluye el desarrollo de conocimiento, el despliegue industrial de las tecnologías renovables y CCUS así como la implantación del uso del hidrógeno en diversas actividades.

El primer paso en el despliegue del hidrógeno de bajas emisiones consiste en promover su producción competitiva aprovechando los diversos y abundantes recursos naturales del país, tanto para en el caso del hidrógeno azul como el del hidrógeno verde.

2.1. Producción de hidrógeno azul

Al hidrógeno que se produce a partir del reformado/gasificación de hidrocarburos, generalmente gas y carbón, se le denomina hidrógeno gris. Cuando a estos procesos se aplica captura junto con utilización o almacenamiento de CO₂, este hidrógeno pasa a denominarse hidrógeno azul. Colombia cuenta con amplias reservas de recursos fósiles, siendo especialmente abundante el carbón, que podrán ser destinados a la producción de hidrógeno azul.

La evolución esperada en Colombia del costo nivelado del hidrógeno (LCOH²⁰) azul y gris para las próximas décadas se muestra en la Figura 2, considerando los incentivos de la ley 2099 de 2021. Se puede observar que los costos del hidrógeno azul se mantienen prácticamente constantes debido a que la reducción de costos de las tecnologías de captura de CO₂ 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 CO₂.

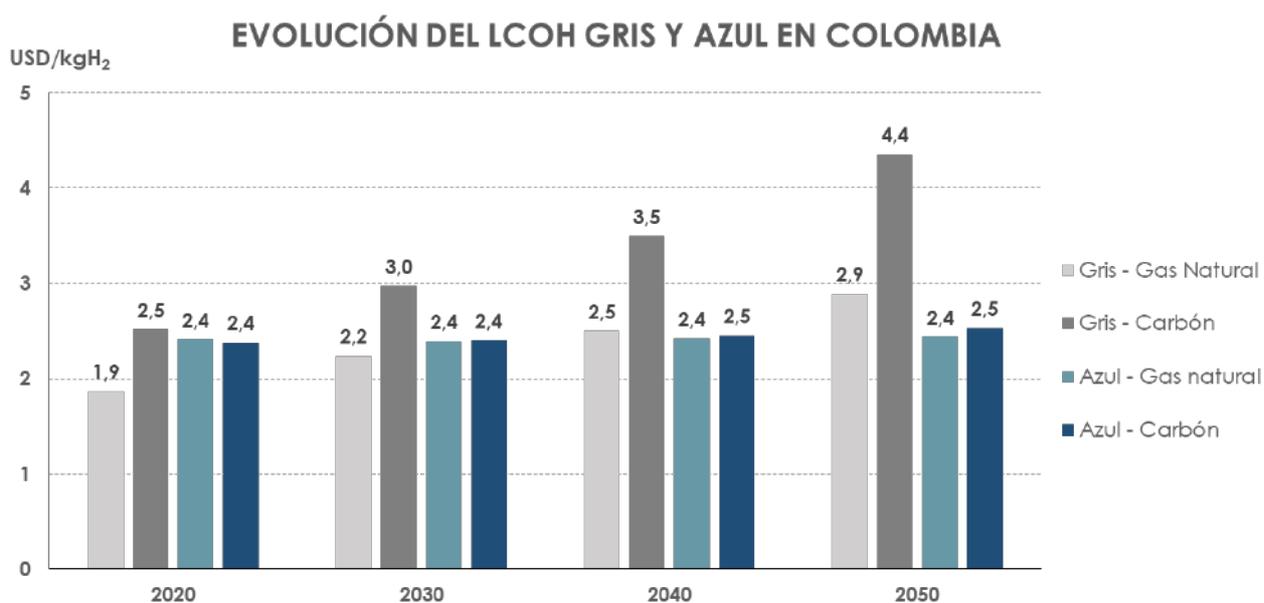


Figura 2: LCOH gris y azul a partir de gas natural y carbón²¹

²⁰ Del inglés "Levelized Cost of Hydrogen"

²¹ Se consideran las emisiones de CO₂ generadas durante los 20 años de vida de proyecto. El modelo considera un costo de 20 USD/tCO₂, (precio suelo medio a nivel internacional) a partir del año 2023, con TCAC del 5%

Para compensar el sobrecosto de la captura y almacenamiento de CO₂, es necesaria la implementación de mecanismos que creen señales de mercado para incentivar al hidrógeno azul frente al gris, es decir, son necesarios precios moderados u altos del CO₂. De hecho, si el coste de CO₂ en Colombia fuera sólo de 10 USD/ton en 2023 con crecimientos anuales del 5%, la competitividad del hidrógeno azul frente al gris no se produciría hasta pasado 2045.

Bajo las condiciones actuales, se espera que el valor del impuesto al carbono alcance un rango entre los 6,2 y 11,2 USD/ ton CO₂ para el año 2030, lo que restringiría la oportunidad para que sectores tradicionales como la minería e hidrocarburos inviertan en tecnologías CCUS y aporten así a las metas fijadas en la NDC 2020 de Colombia. En este sentido, el gobierno trabajará 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 CO₂.

Una primera opción sería la ya mencionada implementación de un sistema de comercio de emisiones con precios moderados u altos. Sin embargo, otros esquemas también son posibles y por ello Gobierno de Colombia evaluará y analizará los siguientes mecanismos: i) Establecimiento de cupos de emisión para el hidrógeno azul y el verde, que puedan ser incluidos en el sistema de cupos transables colombiano definido en la Ley 1931 de 2018 y las metas de la NDC 2020, ii) Identificación y adopción de incentivos en el mercado de cupos transables de las tecnologías CCUS u otro mecanismo que incentive el cumplimiento de la NDC 2020, iii) Habilitación de las tecnologías CCUS como actividad para alcanzar la carbono neutralidad (reglamentación de la Ley 2099 de 2021), que a su vez permita la no causación del impuesto al carbono y iv) Evaluación de la modificación del impuesto al carbono, considerando que el precio alcance el valor de 1 Unidad de Valor Tributario (UVT).

Por otro lado, desde un punto de vista técnico, deberán identificarse localizaciones preparadas para el almacenamiento de CO₂, además de disponer de tecnologías e infraestructura para su captura y transporte, siendo estos aspectos prioritarios dentro de esta hoja de ruta.

La modelización de costes mostrada en la Figura 2 considera únicamente proyectos de nueva construcción. Es importante resaltar que 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.

En consecuencia, el hidrógeno azul haría posible una descarbonización temprana de determinadas aplicaciones industriales, como el sector de refinación. Además, la producción de hidrógeno azul puede implementarse en todas las regiones de Colombia que cuenten con recursos fósiles, abasteciendo la demanda local y garantizando el suministro de hidrógeno a largo plazo. De esta forma el hidrógeno azul resulta una alternativa de bajas emisiones para la transición progresiva de los sectores mineros y gasistas del país a la vez que se aprovechan las grandes reservas de gas y carbón y el know-how experto de la industria colombiana. El hidrógeno azul servirá de base para iniciar la ampliación de la cadena de valor del hidrógeno en Colombia hasta el desarrollo competitivo a gran escala del hidrógeno verde.

2.2. Producción de hidrógeno verde

Se denomina hidrógeno verde al obtenido a partir de energías renovables. Colombia, aprovechando su potencial para las FNCER, impulsará la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis con electricidad renovable como herramienta esencial en la reducción de emisiones.

Además de contar con un sistema de incentivos favorable para el desarrollo de proyectos de hidrógeno, Colombia se beneficiará de las reducciones de costos de la tecnología de electrólisis y de las tecnologías de generación renovable, especialmente de la energía solar fotovoltaica.

Para estimar los costos de la producción renovable, se ha evaluado el recurso eólico y solar en toda la geografía colombiana determinando 8 áreas climáticas.

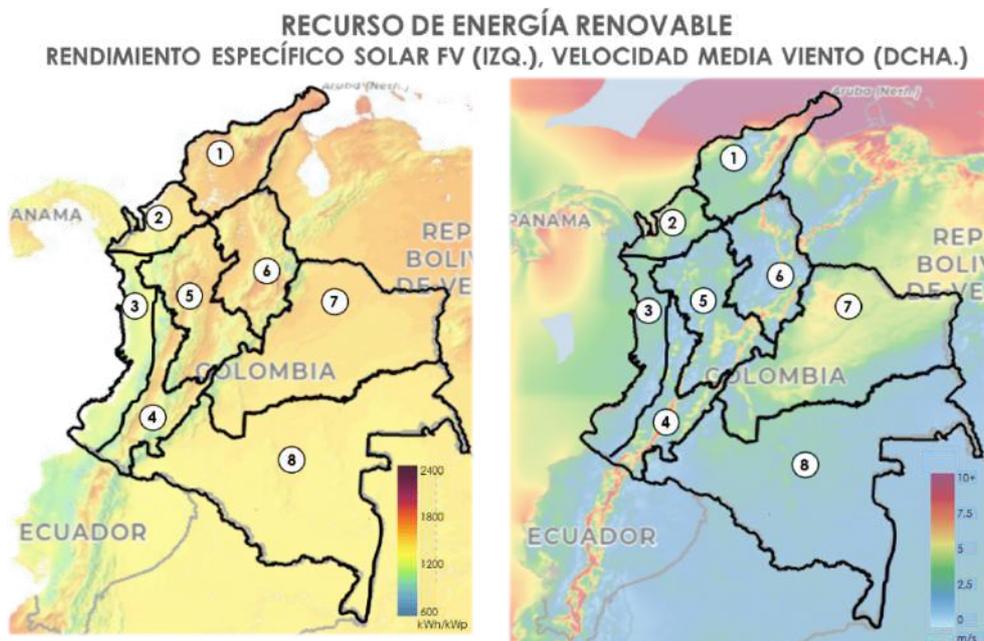


Figura 3: Separación de Colombia por zonas de recurso renovable²²

Cada una de estas regiones está compuesta por varios departamentos o particiones de estos:

1. Caribe Norte: La Guajira, Magdalena, Atlántico, Sucre, Norte de Cesar, Norte de Bolívar
2. Caribe Sur: Córdoba, Norte de Antioquia, Norte de Chocó
3. Pacífico: Sur de Chocó, Oeste de Valle del Cauca, Oeste de Cauca y Oeste de Nariño
4. Andes Sur: Huila, Este de Valle del Cauca, Este de Cauca, Este de Nariño y Quindío
5. Andes Centro: Tolima, Cundinamarca, Sur de Antioquia, Risaralda, Caldas y D.C.
6. Andes Norte: Boyacá, Santander, Norte de Santander, Sur de Cesar, Sur de Bolívar
7. Orinoquía: Vichada, Meta, Casanare, Arauca
8. Amazonía: Guainía, Guaviare, Vaupés, Caquetá, Putumayo, Amazonas

En la Figura 4 se muestra la evolución del LCOH entre 2020 y 2050 en distintas regiones del país considerando los incentivos de la ley 2099 de 2021. Se observa que a partir de 2030 será posible producir hidrógeno verde en algunas regiones a un costo comparable al hidrógeno azul dando lugar a un mix de producción robusto, fiable y competitivo.

Los resultados presentados se corresponden con los valores de factor de capacidad renovable moda²³, es decir, los encontrados con más frecuencia en cada región climática. Sin embargo, se han identificado zonas específicas donde los valores de LCOH pueden resultar aún más competitivos.

²² Separación por zonas climáticas realizada en base al análisis de la competitividad del hidrógeno de bajas emisiones elaborado para la Hoja de Ruta de Colombia. Fondo de imagen obtenido del Global Solar Atlas y del Global Wind Atlas (medido a 100 m de altura).

²³ Moda: término estadístico que define al valor que aparece con mayor frecuencia en un conjunto de datos.

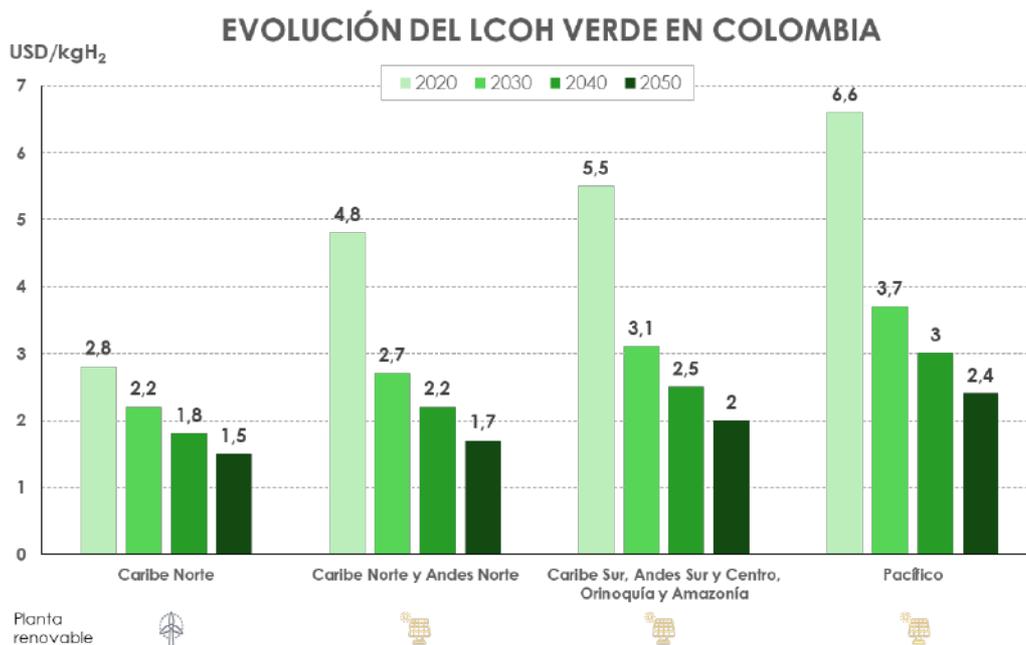


Figura 4: LCOH verde con factor de capacidad renovable moda en las distintas regiones

De hecho, se constata la existencia de un gran recurso eólico en ciertas áreas de la región de Caribe Norte, llegándose a alcanzar factores de planta de hasta un 63% en el departamento de La Guajira, factores equiparables a los de las mejores zonas del mundo. Adicionalmente, se pueden alcanzar costos de producción de energía solar muy competitivos, llegando a factores de planta del 21% en las regiones de Caribe Norte y Andes Norte.

Por tanto, la selección de zonas con factores de planta elevados será clave en el corto plazo para reducir los costos hasta un 25% en el desarrollo de proyectos renovables dedicados a la producción de hidrógeno verde, tal y como se puede apreciar en la Figura 5.

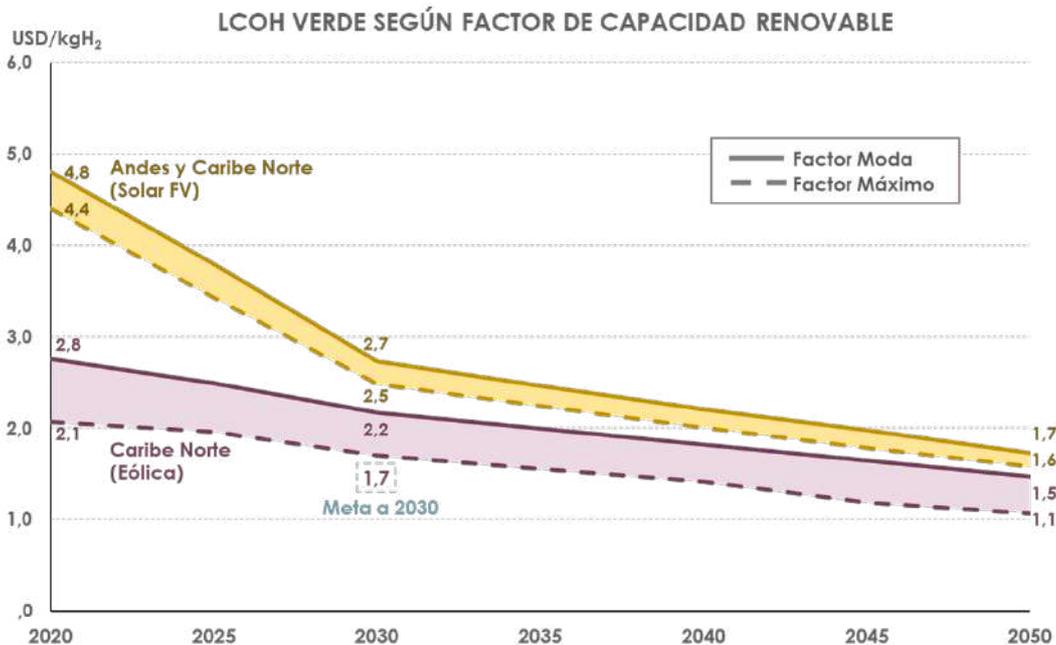


Figura 5: LCOH verde según factores de capacidad renovable moda y máximo

Los costos más competitivos, alcanzados mediante el uso de energía eólica en Caribe Norte, son comparables a los de otros países de referencia. Así, por ejemplo, el valor de LCOH obtenido en 2030 de 1,7 USD/kg es muy similar a los objetivos establecidos en las estrategias de países relevantes

en materia de hidrógeno, tales como de Australia y Chile, posicionándose así Colombia como un actor relevante a nivel global en el futuro mercado de hidrógeno.

El recurso solar del país también podrá ser aprovechado en muchas regiones para abastecer la demanda interna, especialmente a partir de 2030, cuando se espera una importante reducción de los costos para la tecnología solar fotovoltaica.

Hasta ese momento, la producción de electricidad de las plantas renovables dedicadas a la generación de hidrógeno podrá ser complementada con energía de red en todas las regiones conectadas explotando, en la primera fase del despliegue del hidrógeno, el importante recurso hídrico del país y permitiendo una mayor descentralización de proyectos. De hecho, los análisis realizados muestran que el hidrógeno de red podría contribuir a la reducción de los valores de LCOH aunque este resultado se obtiene sólo en las zonas con menor recurso renovable y únicamente durante la próxima década. Por tanto, el uso de la energía de la red se espera principalmente en los primeros proyectos piloto con el objetivo de fomentar un despliegue inicial de nueva demanda que por sus características pueda ser cubierta con plantas de producción descentralizada. Además, se realizarán estudios detallados sobre el uso de las grandes centrales hidroeléctricas, evaluando el potencial de esta fuente de energía renovable convencional en la producción de hidrógeno verde.

Por último, las plantas renovables de tecnologías solar y eólica dedicadas a la producción de hidrógeno verde podrán combinarse con otras fuentes de energía renovable no convencional como la geotermia o la biomasa para aprovechar las sinergias en aquellas regiones que dispongan de estos recursos.

2.3. Evolución de la competitividad del H₂ de bajas emisiones en Colombia

Considerando las distintas perspectivas de evolución de costos de las tecnologías de bajas emisiones y los recursos naturales de Colombia, se espera que el hidrógeno de bajas emisiones se imponga progresivamente en distintas aplicaciones. La comparativa de la evolución del LCOH tanto azul como verde se muestra en la Figura 6.

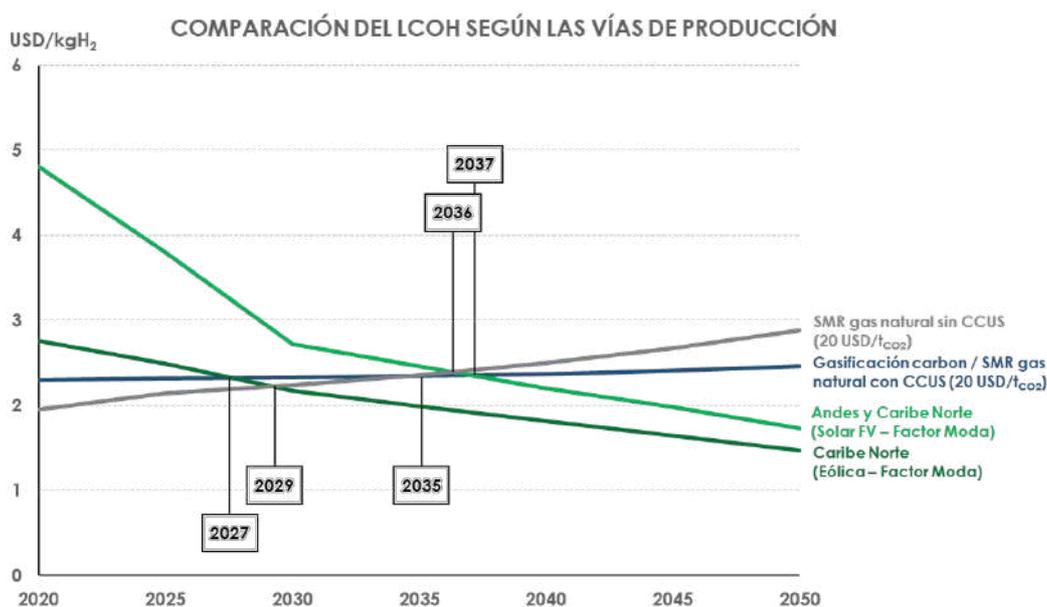


Figura 6: Comparativa del LCOH según las rutas de producción^{24,25}

²⁴Se muestra sólo la curva de H₂ azul a partir de gas natural ya que la obtenida con carbón es similar

²⁵Se muestra el LCOH verde con el factor de capacidad renovable moda en las dos regiones más competitivas

Para la comparativa, se han considerado el factor de capacidad renovable moda de Caribe Norte y Andes Norte como referencia para el hidrógeno verde y un escenario de precios medios del CO₂ para mostrar la evolución del hidrógeno azul. Los resultados obtenidos indican tres principales fases de despliegue del hidrógeno de bajas emisiones en el horizonte 2020-2050:

- A corto plazo, el hidrógeno azul es la opción de bajas emisiones más favorable, sobre todo si se aprovechan las infraestructuras industriales existentes. Sin embargo, ya en 2030, la producción de hidrógeno verde en las zonas con mejor recurso eólico del país (Caribe Norte) comienza a presentarse como la alternativa más competitiva.
- Entre 2030 y 2040, se espera la coexistencia del hidrógeno azul y verde según el recurso natural disponible para su producción en cada región de Colombia. De hecho, 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.
- A partir de 2040, el H₂ verde se impondrá como la alternativa más competitiva en todo el territorio colombiano.

Las tres fases de despliegue se pueden observar en la Figura 7, donde se indica además el LCOH bajo en emisiones (USD/kgH₂) más competitivo en cada región.

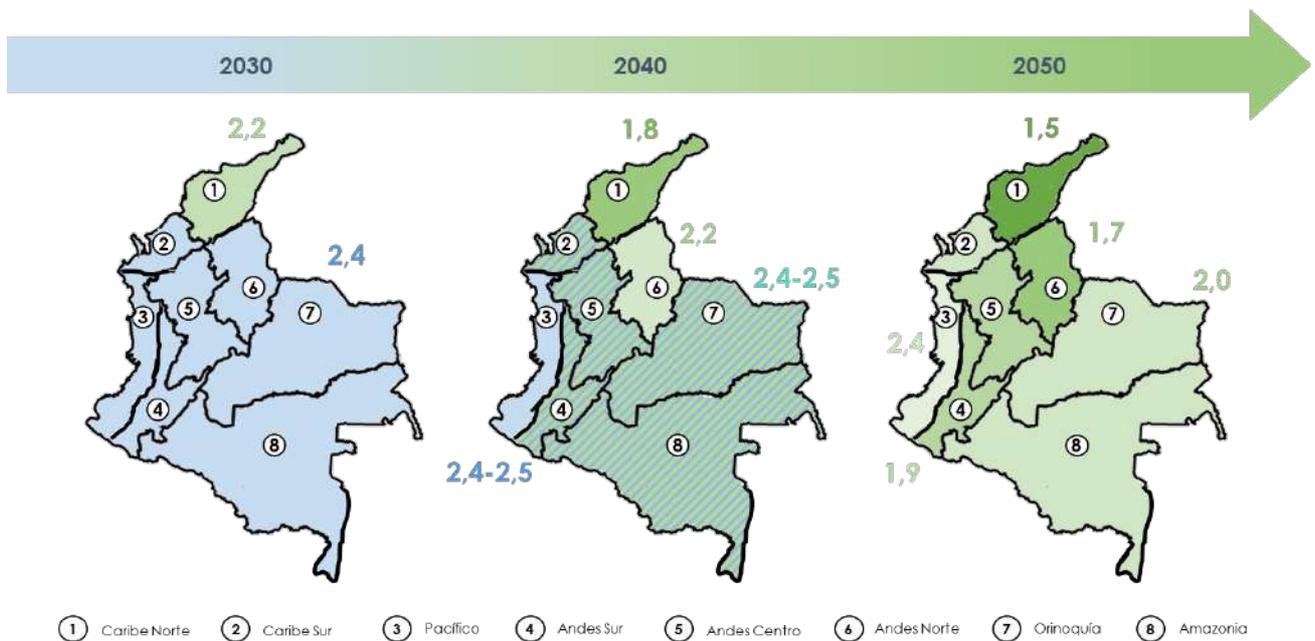


Figura 7: Competitividad de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia

El hidrógeno azul dispone de una ventana de oportunidad limitada al corto/medio plazo, aunque su uso puede contribuir a la descarbonización de sectores industriales importantes. Además, la producción temprana de hidrógeno azul podría facilitar también el despliegue general del hidrógeno como vector energético en el país gracias al desarrollo de las tecnologías de transporte, distribución y almacenamiento, así como resolver retos técnicos asociados a la captura, transporte y secuestro de CO₂ en Colombia.

El hidrógeno verde será la ruta de producción de referencia para abastecer la demanda de hidrógeno de bajas emisiones en el largo plazo. Así mismo, la competitividad a nivel internacional de los costos obtenidos en las costas del Caribe posibilitará la creación de un nuevo mercado de exportaciones que transformará la balanza comercial nacional hacia energéticos de menores emisiones.

3. Demanda nacional y exportación de hidrógeno y derivados

En la actualidad, el hidrógeno a nivel global se consume como materia prima en diversas actividades industriales como la refinación, la industria química o la siderurgia. De hecho, en Colombia, la demanda anual de hidrógeno, estimada en 150 kt, se produce mediante reformado de gas natural (hidrógeno gris) y se consume principalmente en las refinerías. El resto de la demanda se distribuye entre la producción de fertilizantes y otros usos industriales menores, como la producción de vidrio flotado o el procesado de grasas y aceites para la alimentación, en los que se utiliza también hidrógeno electrolítico producido con electricidad de la red.

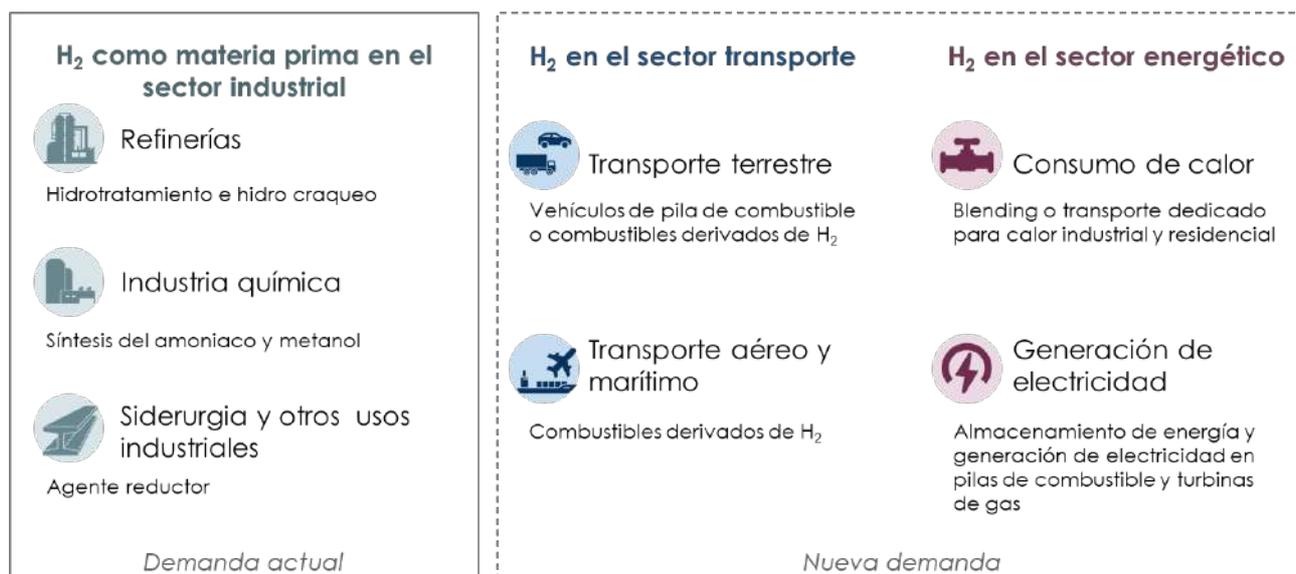


Figura 8: Principales aplicaciones actuales y futuras del hidrógeno

Sin embargo, el hidrógeno de bajas emisiones se presenta como un nuevo vector energético clave en la transformación y descarbonización de la economía colombiana. En primer lugar, el hidrógeno y sus derivados ofrecen oportunidades para la modernización y el desarrollo de múltiples aplicaciones industriales además de sustituir a los combustibles fósiles en otros sectores como el transporte o la generación eléctrica.

A nivel internacional, Colombia formará parte de un nuevo mercado energético que abarca tanto los países cercanos de Latinoamérica como los grandes focos de demanda de hidrógeno de bajas emisiones en otros continentes, contribuyendo así a su apertura internacional.

3.1. Demanda esperada de hidrógeno y derivados de bajas emisiones

En el futuro, los nuevos usos del hidrógeno y sus derivados provocarán en Colombia un aumento exponencial de la demanda total de hidrógeno de bajas emisiones en el horizonte 2020-2050. Las principales fuentes de demanda serán el sector transporte y la industria, aunque el porcentaje relativo de cada sector varía a lo largo del periodo tal y como se muestra en la Figura 9.

A corto plazo se espera un crecimiento moderado de la nueva demanda de hidrógeno de bajas emisiones llegando a las 120 kt en 2030, que incluyen tanto un reemplazo parcial de las 150 kt de hidrógeno gris consumido en la actualidad como algunos usos nuevos. La demanda industrial será la primera en desarrollarse, motivada por la descarbonización de procesos que consumen hidrógeno actualmente en Colombia: la refinación de combustibles y la producción de fertilizantes. Por otra parte, se estima que la demanda del sector transporte comenzará a partir de 2026, fundamentalmente en el transporte terrestre pesado (autobuses y camiones).

Hacia 2040, el sector transporte experimentará un fuerte crecimiento, equiparándose su demanda a la del sector industrial. En esta década también se espera la aparición de los primeros proyectos relativos al uso del hidrógeno de bajas emisiones en otras industrias y en generación eléctrica.

En la década entre 2040 y 2050 se consolidarán en Colombia los nuevos usos del hidrógeno de bajas emisiones estimándose la demanda interna en aproximadamente 1.850 kt para 2050. El sector transporte se alza como el principal demandante de hidrógeno, alcanzando el 64% de la demanda total, es decir, 1.180 kt de hidrógeno. Este aumento considerable se deberá tanto a la irrupción del hidrógeno de bajas emisiones en el transporte aéreo y marítimo como al crecimiento de su demanda en el transporte por carretera. En el sector industrial, los nuevos usos del hidrógeno de bajas emisiones se reparten de manera equilibrada entre los sectores de fertilizantes, minería y siderurgia, mientras que la refinación se mantiene como el subsector con mayor demanda. Por último, la demanda en el sector eléctrico continúa representando un porcentaje relativamente pequeño (de alrededor del 2% de la demanda total de hidrógeno) equivalente a 37 kt en 2050.

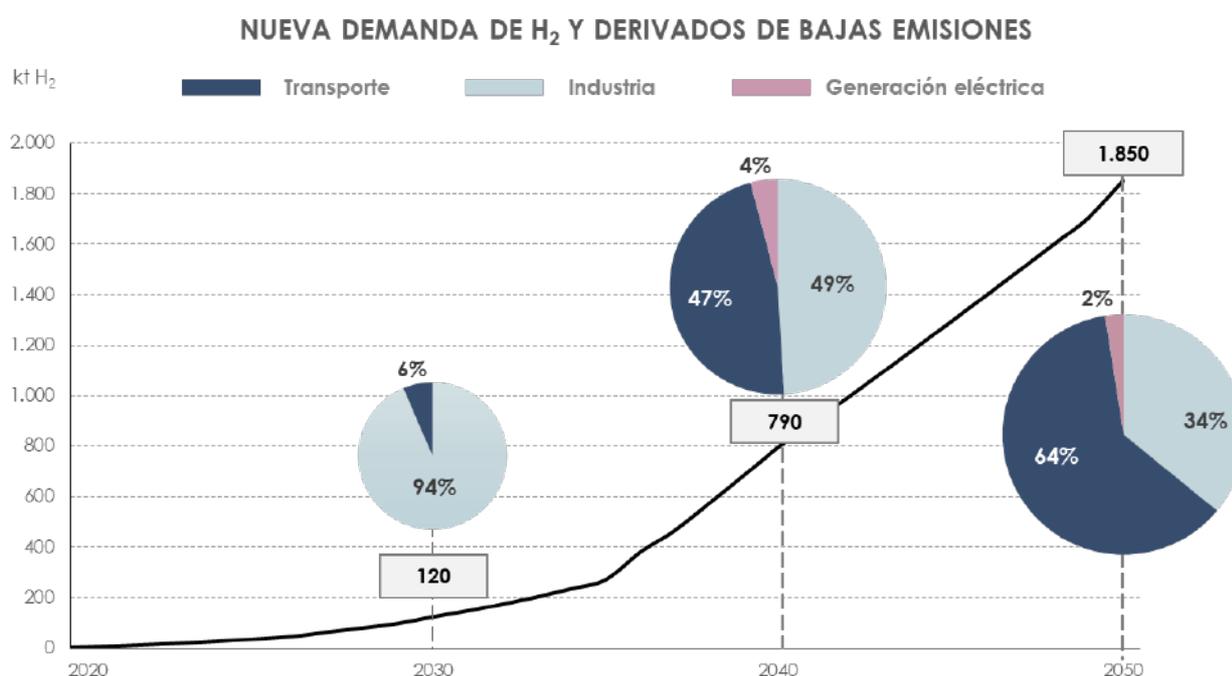


Figura 9: Evolución prevista de la nueva demanda de hidrógeno y derivados de bajas emisiones

La demanda de hidrógeno de bajas emisiones contempla tanto la demanda relacionada con la utilización directa del hidrógeno como la producción de derivados del hidrógeno, que permiten la descarbonización de algunas aplicaciones donde el hidrógeno puro no resulta tan competitivo o presenta dificultades en su transporte y distribución.

De acuerdo con los resultados obtenidos, un 40% de la demanda total de hidrógeno a 2050, es decir 740 kt de hidrógeno, serán utilizadas para abastecer la producción de derivados de bajas emisiones, principalmente en forma de amoníaco y de combustibles sintéticos (Figura 10). El amoníaco se utilizará inicialmente en la producción de fertilizantes, reduciendo así las importaciones de Colombia en este ámbito e impulsando esta industria a nivel local. Además, el amoníaco de bajas emisiones transformará la demanda de combustibles en el transporte marítimo sustituyendo a los combustibles fósiles. De manera similar, en el transporte aéreo, la falta de alternativas para mitigar sus emisiones forzarán la utilización de combustibles sintéticos.

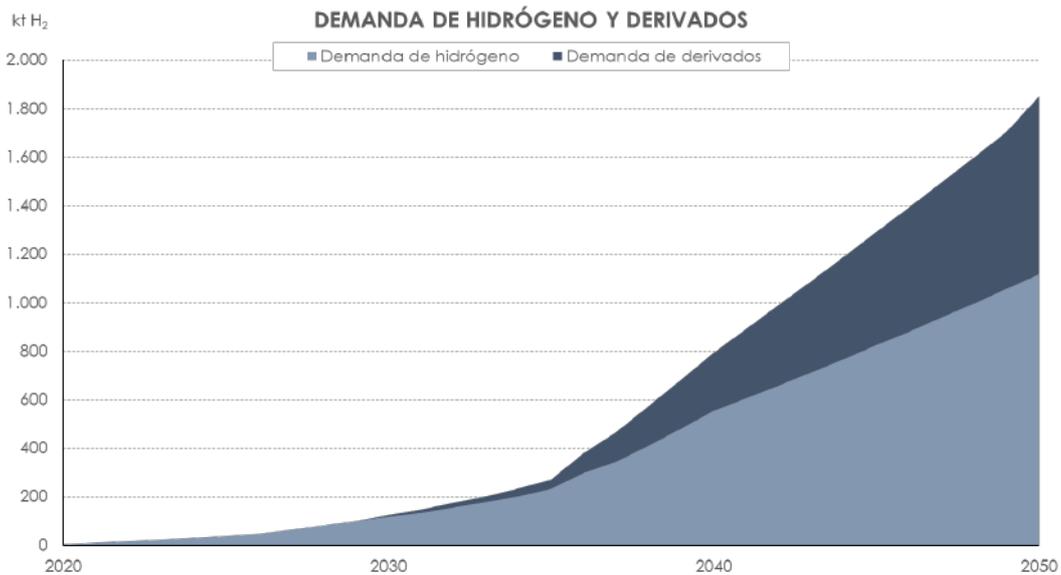


Figura 10: Nueva demanda de hidrógeno y derivados de bajas emisiones en Colombia

La penetración esperada del hidrógeno en cada subsector mencionado se sintetiza en la Figura 11. Se han considerado dos factores en la determinación del año de inicio del uso de hidrógeno de bajas emisiones para cada aplicación: en primer lugar, se ha calculado el año previsto como punto de equilibrio, es decir, el año en el cual el uso del hidrógeno es competitivo frente a la alternativa convencional fósil. Se tiene en cuenta, además, no sólo la competitividad en costos, sino el desarrollo de conocimiento y la madurez en la implementación de las tecnologías de hidrógeno para cada aplicación, impulsados por la realización de proyectos piloto y demostraciones llevadas a cabo por empresas colombianas.

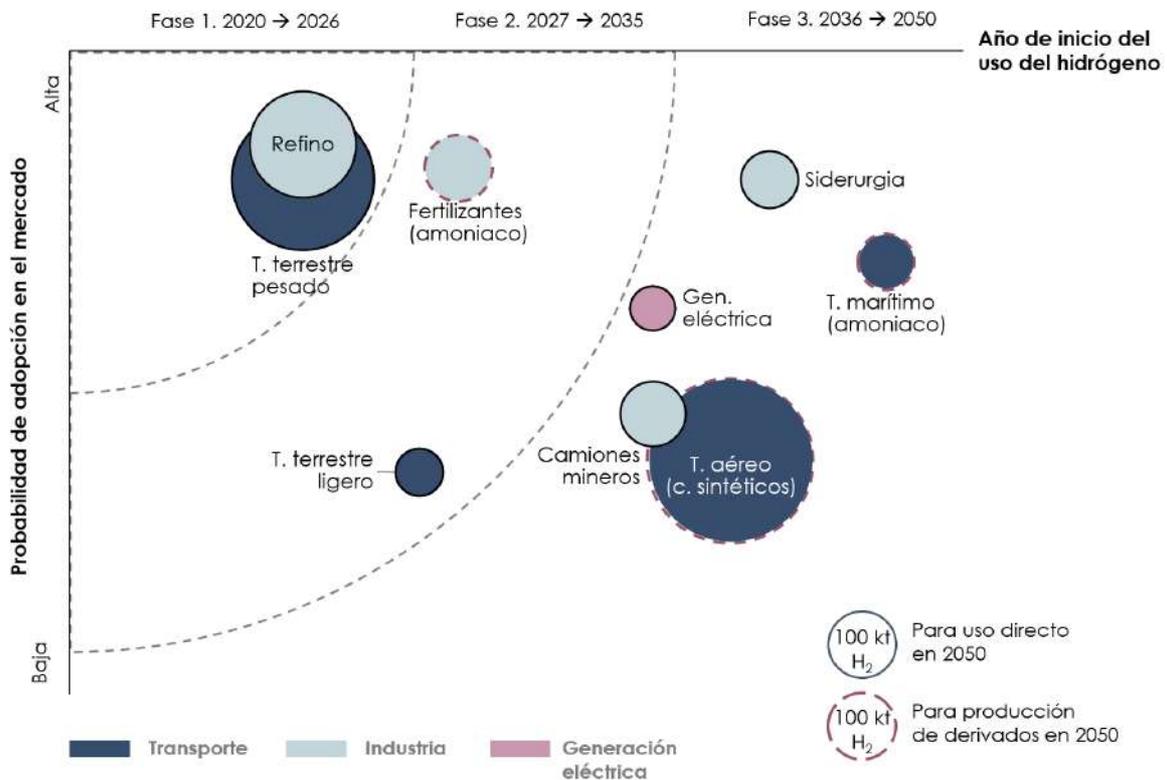


Figura 11: Desarrollo de las aplicaciones de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia

En el eje vertical se muestra la probabilidad de adopción que depende de la madurez tecnológica, la dificultad de desarrollo de la cadena de valor y la existencia de alternativas más competitivas

que el hidrógeno para descarbonizar la aplicación. El diámetro de las circunferencias representa la demanda de hidrógeno prevista en 2050 para cada uso.

La penetración del hidrógeno por aplicaciones tendrá lugar en tres fases diferenciadas en función de la probabilidad de adopción en el mercado del hidrógeno para cada uso final:

- **Fase 1. Aplicaciones existentes (2020 → 2026):** El hidrógeno de bajas emisiones comenzará a consumirse en las refinerías como vía de remplazo del hidrógeno gris. Parte de este hidrógeno será azul, proveniente de la aplicación de captura y almacenamiento de CO₂ en plantas de reformado de gas natural con vapor existentes. Esta fase también contará con la penetración del hidrógeno en el sector del transporte terrestre pesado (camiones y autobuses) que, aunque con una demanda relativamente pequeña (0,4 kt en 2026), comenzarán a tener peso mediante proyectos piloto y casos de uso particulares (p. ej. descarbonización del transporte público).
- **Fase 2. Aplicaciones emergentes (2027 → 2035):** El hidrógeno comenzará a ser competitivo y a utilizarse en nuevos sectores. En esta fase entrarán unas aplicaciones con capacidad de fomentar la industria en Colombia: la producción de fertilizantes nitrogenados bajos en emisiones que reduzcan las importaciones actuales. Además, la disminución en costos del hidrógeno verde dará lugar a la entrada de vehículos de transporte ligero a partir de 2029.
- **Fase 3. Aplicaciones disruptivas (2036 → 2050):** En esta última fase se producirá un gran despliegue del hidrógeno en las aplicaciones anteriores, pues el uso de hidrógeno verde será más competitivo que las alternativas fósiles. En paralelo, se abrirán nuevas oportunidades para el hidrógeno, que comenzará a demandarse para aplicaciones que actualmente están poco maduras tecnológicamente. Estas nuevas aplicaciones permitirán descarbonizar nuevos sectores tales como el transporte marítimo y aéreo mediante derivados. También se espera la entrada del hidrógeno en generación eléctrica como método de almacenamiento estacional flexible ante un despliegue mayoritario de las FNCER y su posterior uso en plantas de ciclo combinado alimentadas por hidrógeno o pilas de combustible. En el sector industrial, en esta tercera, el hidrógeno se utilizaría en la producción de acero primario mediante reducción directa (DRI), o en la industria minera mediante el uso de camiones mineros de pila de combustible.

Se concluye que, el refino y el transporte pesado por carretera son las aplicaciones que alcanzan en primer lugar la paridad en costos con su alternativa fósil (antes de 2030). Por ello, estas aplicaciones serán prioritarias a la hora de desplegar nuevos proyectos de hidrógeno puesto que permitirán traccionar la nueva demanda contribuyendo a una descarbonización en el corto plazo.

3.2. Abatimiento de emisiones asociadas al uso de hidrógeno

La introducción del hidrógeno de bajas emisiones en procesos en los que sustituye a combustibles o insumos de origen fósil contribuirá a la reducción de las emisiones de CO₂ del país. Para el caso de Colombia, la introducción del hidrógeno de bajas emisiones puede llegar a abatir más de 13 Mt de CO₂ en 2050, lo que supondría alrededor del 14% de todas las emisiones de usos energéticos y procesos industriales del año 2019 (99 Mt de CO₂).

Alineado con la distribución de la demanda de hidrógeno, la mayor parte de las emisiones abatidas se dan en los sectores transporte e industria. A 2030 la reducción de emisiones vendrá fundamentalmente dada por la penetración del hidrógeno en el sector industrial, mientras que el sector del transporte toma un papel secundario.

No obstante, esta distribución cambia con el tiempo, llegando el transporte a suponer el 70% de las emisiones abatidas por hidrógeno en Colombia a 2050 (Figura 12). De hecho, en el largo plazo, el

transporte aéreo es el subsector que supone un mayor abatimiento de emisiones (5050 kt de CO₂ abatidas en 2050) debido a su alta intensidad en carbono y las pocas alternativas que existen para descarbonizarlo. En segundo término, el transporte por carretera, principalmente transporte pesado (camiones y autobuses), puede alcanzar hasta 4100 kt de CO₂ abatidas en 2050.

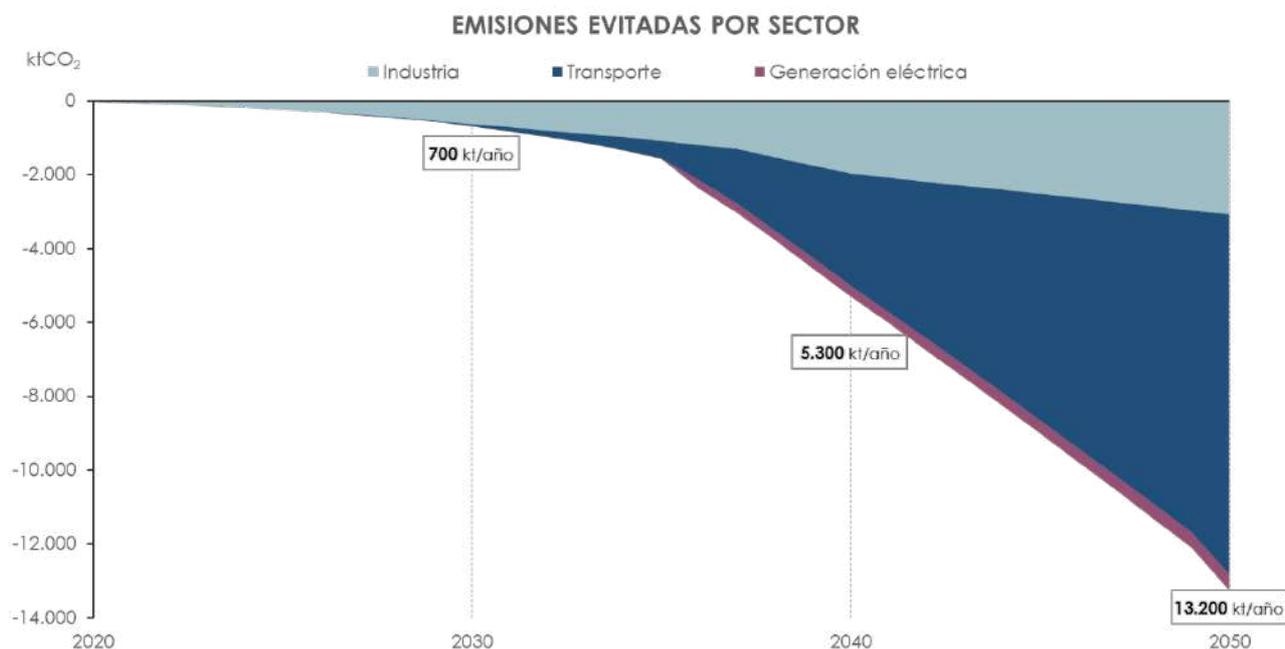


Figura 12: Reducción de emisiones en Colombia por consumo de H₂ en cada sector

Dentro del sector industrial, el sector de refinación se posiciona como el tercer sector donde se da una mayor reducción de emisiones, pudiendo alcanzar 1700 kt de CO₂ en 2050. Estos tres sectores son claramente los dominantes en cuanto a abatimiento de emisiones y deben, por tanto, ser los sectores prioritarios.

3.3. Potencial de exportación

Colombia aspira a convertirse en un referente en la economía global del hidrógeno gracias a sus excepcionales recursos renovables y al decidido impulso del gobierno para favorecer su despliegue. Por ello, Colombia competirá en los mercados internacionales del hidrógeno de bajas emisiones, alcanzando en el largo plazo un potencial exportador equiparable en ingresos a sus actuales exportaciones de carbón (más de 5 billones de dólares).

A nivel global, se han identificado tres grandes regiones donde se concentrará la demanda de hidrógeno y que se considera que necesitarán importar parte de dicha demanda (Figura 13). Asia será el principal foco de demanda de hidrógeno, con una demanda total de más de 190 Mt en 2050 y con necesidades de importación relevantes tanto en términos absolutos (China) como en términos relativos a su demanda total (Japón, Corea e India). En concreto, Japón está desarrollando en la actualidad proyectos que validen la cadena de suministro de hidrógeno desde otras geografías y espera importar hidrógeno tanto verde como azul.

En la Unión Europea, se desarrollará una demanda de aproximadamente 60 Mt de hidrógeno en 2050 que será cubierta por producción local por exportaciones provenientes de países cercanos (Marruecos, Noruega, etc.) y eventualmente por otros países exportadores como Colombia.

Por último, en Estados Unidos la demanda de hidrógeno podría llegar a alcanzar también las 60 Mt de hidrógeno en 2050. Sin embargo, el buen recurso renovable que puede encontrarse en muchas

regiones de este país, sus abundantes y competitivos recursos fósiles y su constante apuesta por la independencia energética sugieren que, de darse una demanda de importación de hidrógeno en Estados Unidos, esta será pequeña en términos relativos a su demanda total esperada a 2050.

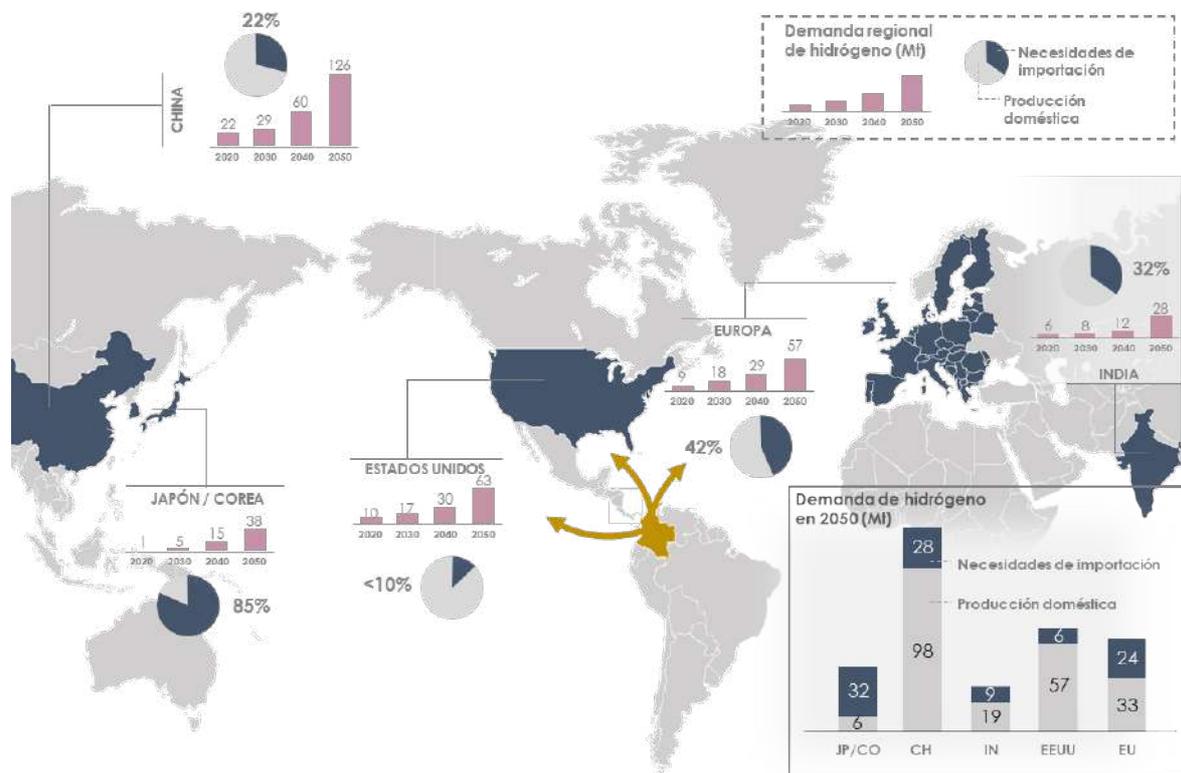


Figura 13: Principales focos de demanda de hidrógeno a nivel global²⁶

Mientras Colombia puede aprovechar sus abundantes energéticos y recursos hidráulicos y de FNCER para producir el hidrógeno que sirva la demanda doméstica, en el norte del país se ambiciona la creación de un hub logístico de exportación aprovechando el destacado potencial eólico y solar de la región, especialmente el recurso eólico de muy alta calidad en la península de La Guajira. El hub de exportación de hidrógeno del Caribe podrá servir la demanda de hidrógeno en mercados situados tanto en el Atlántico como en el Pacífico. Este hub está estratégicamente situado cerca de Norteamérica, con salida directa hacia los mercados europeos a través del Caribe y con acceso a los mercados asiáticos, bien a través del canal de Panamá o desde los puertos colombianos del Pacífico previo transporte por ducto. Colombia también estaría idóneamente posicionada para servir las demandas de hidrógeno que puedan desarrollarse en los países de América Central.

Colombia ampliará las infraestructuras portuarias actuales y se buscará obtener acuerdos bilaterales con los países importadores para posicionar a Colombia como un actor relevante en los mercados mundiales de hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados.

²⁶ Mapa elaborado por i-deals mediante el análisis de las estrategias de hidrógeno publicadas por los diferentes países y regiones.

4. Horizonte 2030 y 2050

4.1. Pilares de la Hoja de Ruta

La estrategia elaborada se cimienta en 5 pilares que buscan el desarrollo social, medioambiental y económico de Colombia, y que son el fruto de un trabajo colaborativo de múltiples actores públicos y privados.



Figura 14: Pilares de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia

1. El hidrógeno como una pieza clave para alcanzar la carbono neutralidad de Colombia

Colombia se ha comprometido con un ambicioso objetivo de alcanzar la carbono neutralidad en año 2050 comenzando este proceso durante la próxima década. El hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados serán una herramienta más para una descarbonización profunda de la economía y su despliegue atenderá a razones de costo-beneficio. El hidrógeno tendrá cabida en aplicaciones en las que la electrificación no es viable o no hay otros energéticos adecuados desde un punto de vista de costo, ambiental o técnico. Aplicaciones como el transporte pesado de larga distancia, el transporte aéreo y marítimo, así como distintos sectores industriales se beneficiarán de estos energéticos.

El hidrógeno verde facilitará además el despliegue e integración de mayor capacidad de generación de FNCER favoreciendo una economía sostenible, facilitando la gestión del sistema y habilitando el transporte y el almacenamiento de energía.

2. El desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno como vía hacia una economía de exportación de bajas emisiones

Colombia dispone de áreas geográficas con recursos naturales para la producción de energía renovable equiparables a las mejores del mundo, así como de un posicionamiento geoestratégico entre dos océanos con rutas marítimas a todos los continentes. Esto permitirá a Colombia competir en un mercado global en el que las grandes economías industriales importarán hidrógeno de bajas emisiones para cumplir sus objetivos de descarbonización. Para ello, será necesaria la cooperación con dichos países de modo que se pueda acceder a tecnología, capacitación e inversión que posicionen a Colombia en un mercado incipiente.

La exportación de energéticos de origen fósil es uno de los pilares de la balanza comercial colombiana. Sin embargo, la transición global hacia una economía de bajas emisiones dará lugar a una progresiva reducción de las exportaciones de estos energéticos hacia nuestros principales clientes internacionales y su uso local. La producción y exportación de hidrógeno, aprovechando los recursos naturales colombianos, compensará progresivamente la disminución del peso de los energéticos tradicionales en nuestra economía.

El hidrógeno atraerá inversiones y generará nuevos empleos de manera que la descarbonización sea un impulso para la economía colombiana. El Gobierno y las autoridades aprovecharán el hidrógeno no solo para su exportación, sino para el desarrollo de nueva capacidad industrial nacional.

Colombia puede atraer oportunidades dentro de las cadenas de valor tecnológicas mediante fabricación de equipos para la producción, transporte, almacenamiento y transformación de hidrógeno a través de cooperación internacional. Asimismo, la utilización del hidrógeno producido con bajos costos en Colombia abre la puerta para el establecimiento de industrias de bajas emisiones que lo utilicen en sus procesos.

El fomento de la innovación e investigación, el apoyo a la industria local y la atracción de inversión serán claves para maximizar la creación de riqueza y puestos de trabajo mediante la extensión de la cadena de valor del hidrógeno y la creación de clústeres industriales.

3. El hidrógeno como habilitador de una transición energética justa

El hidrógeno de bajas emisiones es una oportunidad para la transición justa diseñada para mantener el empleo de los sectores impactados por la descarbonización e involucrar a las unidades territoriales, comunidades, ciudades, academia y empresas a la vez que abre nuevas puertas para la creación de nuevo tejido industrial que aproveche la competitividad del hidrógeno producido en Colombia.

El despliegue de la industria del hidrógeno de bajas emisiones en zonas mineras y petroleras se beneficiará del aprovechamiento de las infraestructuras y capacidades profesionales existentes permitiendo una transición justa y equilibrada. De igual forma, el hidrógeno verde abre nuevas oportunidades de desarrollo local en nuevas regiones con alto potencial de producción de energías renovables contribuyendo a un desarrollo económico equilibrado y cohesivo entre territorios.

4. El Gobierno Nacional comprometido con el despliegue del hidrógeno de bajas emisiones

El Gobierno tiene un claro compromiso con el despliegue del hidrógeno de bajas emisiones como motor de desarrollo económico, social y medioambiental. Estamos en las primeras fases de creación de esta industria a nivel global y debe establecerse un marco regulatorio y de incentivos que favorezca la implantación de los primeros pilotos.

El Gobierno desarrollará en el corto plazo un marco regulatorio y normativo transparente y estable, junto con una estrategia de incentivos. Además, se realizará un planeamiento integrado de infraestructuras que permita los primeros despliegues. Dichas iniciativas involucrarán al sector privado, la academia y la sociedad civil como actores clave en el despegue de la industria en Colombia.

5. El hidrógeno como vía de integración del territorio y herramienta de desarrollo inclusivo

El desarrollo de la economía del hidrógeno pondrá en el centro a las comunidades desde el inicio, teniendo en cuenta su situación actual, necesidades, aspiraciones y capacidades. El Gobierno y autoridades locales pondrán en marcha un plan de socialización que traslade el potencial del hidrógeno para transformar económicamente las comunidades mediante la generación equilibrada de riqueza y empleo a la vez que se capacita el personal y se protegen los recursos naturales, las personas y el medio ambiente.

Se involucrará a las comunidades en el diálogo a cerca de las oportunidades para el territorio de la las FNCER en general, y el hidrógeno en particular, situándolas en el centro de la planeación territorial y económica. El diálogo involucrará también a los promotores para definir las mejores prácticas para el desarrollo económico local favoreciendo la creación compartida de valor.

4.2. Metas a 2030

El Gobierno de Colombia ha establecido ambiciosas metas nacionales a 2030, tanto del lado de la producción como del de la demanda, cuya consecución permitirá desarrollar las capacidades técnicas e industriales y la experiencia necesaria para poder aprovechar todo el potencial futuro del hidrógeno. Los instrumentos principales para alcanzar los objetivos fijados a 2030 son las medidas descritas en los ejes de actuación que se detallan en el capítulo siguiente.



Figura 15: Metas de país en materia de hidrógeno a 2030

En lo relativo a la **producción de hidrógeno de bajas emisiones**, se espera a 2030:

- Desarrollar **entre 1 y 3 GW de electrólisis** que se ubicarán tanto en regiones de alto recurso renovable como La Guajira, como en lugares próximos al consumo con el objetivo de minimizar los costos asociados al transporte, implicando la instalación de al menos 1,5 - 4 GW de FNCER en el país. Alcanzar esta capacidad instalada de electrólisis permitirá asimismo posicionar a Colombia como un país exportador de hidrógeno.
- Alcanzar un **hidrógeno verde** competitivo, logrando **costos de 1,7 USD/kg** cuando se produzca en las zonas de recurso renovable óptimo (ver Figura 5).
- Producción de al menos **50 kt de hidrógeno azul** mediante la captura de CO₂ en plantas SMR existentes o nuevas plantas (SMR o gasificación) para su almacenamiento o utilización.

Respecto a la **demanda de hidrógeno**, se prevé una importante penetración en sectores industriales, principalmente en refinación e industrias química y fertilizantes, así como un comienzo de la demanda en el sector de transporte terrestre. En estos sectores se espera alcanzar a 2030:

- Flota de al menos **1.500 – 2.000 vehículos ligeros** de pila de combustible para transporte de pasajeros y carga. Se considera esencial fomentar el desarrollo de hidrogeneras en grandes núcleos de población, fomentando la adquisición de vehículos de hidrógeno para aplicaciones de gran recorrido como taxis o furgonetas de reparto²⁷.
- Flota de al menos **1.000 – 1.500 vehículos pesados** de pila de combustible para transporte de pasajeros y carga. Se pondrá foco en el despliegue de hidrogeneras en rutas de gran tránsito de vehículos que conecten ciudades del país, fomentando la adopción de esta tecnología por empresas de transporte de mercancías y pasajeros. Además, derivado de la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica²⁸, se prevé una importante participación del hidrógeno dentro de la flota de buses intermunicipales del país.

²⁷ Esta meta es complementaria a las metas ya establecidas para la entrada de vehículos de batería eléctrica

²⁸ 100% de los vehículos públicos adquiridos para transporte masivo eléctricos o con cero emisiones a 2035

- Red de al menos **50 – 100 hidrogeneras** de acceso público para el repostaje de los vehículos anteriores. Estas estaciones se concentrarán en grandes núcleos de población y rutas comerciales, garantizando una alta demanda de hidrógeno y su viabilidad económica.
- Consumo de un **40% de hidrógeno de bajas emisiones en el sector industrial** respecto del total del hidrógeno consumido actualmente en el sector, considerando el consumo de hidrógeno como materia prima y su uso como fuente energética.

Las metas anteriores habilitarán tres objetivos transversales:

- Movilizar **entre 2.500 y 5.500 millones de dólares de inversión** durante el periodo 2020/30, correspondiendo el rango inferior a la meta de 1 GW a 2030 y el superior a los 3 GW. Estas inversiones provendrán principalmente del sector privado, aunque contarán con apoyo público en los casos en los que se precise.
- La inversión anterior generará un efecto multiplicador en toda la cadena de valor del hidrógeno en términos de creación de riqueza y empleo. En particular se espera la **creación de entre 7.000 y 15.000 empleos directos e indirectos** durante la década 2020/30 gracias al desarrollo de proyectos de producción, demanda y transporte de hidrógeno.
- Contribuir a la descarbonización de Colombia con el **abatimiento de 2,5 – 3 millones de toneladas de CO₂** durante el periodo 2020/30 gracias al uso de hidrógeno de bajas emisiones en transporte e industria. Además, se estima que a 2030 se evite aproximadamente la emisión anual de 0,7 millones de toneladas de CO₂.

4.3. Ambición a 2050

La estrategia nacional a largo plazo se divide en dos periodos principales:

- **Periodo 2020-2030:** El hidrógeno de bajas emisiones penetra únicamente en aquellas aplicaciones más competitivas. Este periodo destaca por una estrecha colaboración público-privada que habilitará y fomentará el desarrollo del mercado.
- **Periodo 2030-2050:** El hidrógeno es competitivo en un gran número de aplicaciones, lo que desencadena un gran aumento de la demanda tanto a nivel nacional como internacional. Durante este periodo comienza la exportación a otras geografías y se habilitan las aplicaciones de menor madurez tecnológica.

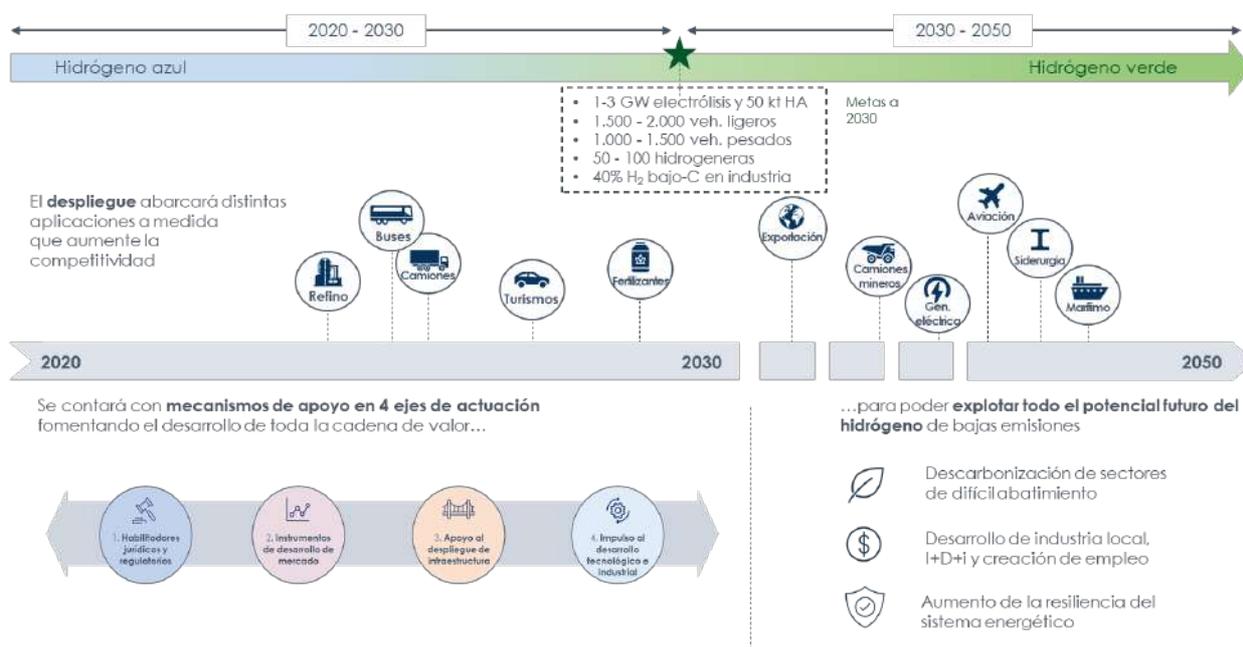


Figura 16: Estrategia nacional a 2050 en materia de hidrógeno de bajas emisiones

5. Nuestro compromiso enmarcado en 4 ejes

El Gobierno Nacional ha establecido 4 ejes de actuación sobre los cuales se han definido una serie de medidas e instrumentos orientados a garantizar el correcto desarrollo del mercado del hidrógeno de bajas emisiones. Será responsabilidad de los ministerios competentes velar por que las medidas definidas se apliquen y financien en base a las partidas presupuestarias y a los planes financieros existentes.



Figura 17: Ejes de actuación de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia

1. **Habilitadores jurídicos y regulatorios:** Medidas orientadas a establecer un marco regulatorio claro, coherente y justo. En primer lugar, la legislación aplicable debe ser precisa y estable a fin de proporcionar certidumbre, fomentando así la inversión privada y el desarrollo de proyectos. Además, un régimen normativo y de fiscalización adecuado da lugar a una competencia justa entre vectores energéticos y empresas, permite velar por los intereses de todas las partes involucradas incluyendo usuarios finales, inversores, operarios y población, así como proteger el medioambiente y generar una alineación con las estrategias climáticas de cada uno de los sectores a través de los Planes Integrales de Gestión de Cambio Climático Sectoriales.
2. **Instrumentos de desarrollo de mercado:** Mecanismos y herramientas destinados a incentivar la transición desde las soluciones convencionales basadas en combustibles fósiles a tecnologías limpias de hidrógeno, fomentando tanto la producción como el consumo de hidrógeno de bajas emisiones, entre las que se encuentra el sistema nacional de cupos transables para el comercio de emisiones de CO₂.
3. **Apoyo al despliegue de infraestructuras:** Acciones orientadas a facilitar el despliegue efectivo y coordinado de infraestructuras de transporte y distribución de hidrógeno, solventando así la que se considera una de las principales barreras al uso del hidrógeno en la actualidad. Estas acciones tendrán en cuenta la interacción con la infraestructura de transporte de electricidad y gas natural, así como las estaciones de servicio existentes en Colombia con el fin de aprovechar sinergias y minimizar los costos del despliegue.
4. **Impulso al desarrollo tecnológico e industrial:** Medidas destinadas a garantizar el desarrollo de la industria de manera sostenible y con valor socio-económico para el país. Estos instrumentos se apalancarán en los recursos técnicos e industriales existentes, impulsando la investigación, el desarrollo tecnológico, la innovación nacional y la elaboración de una normativa técnica que vele por la seguridad de todos.

5.1. Mapa de actuación

Para cada uno de los ejes mencionados se han definido varias líneas de trabajo, subnivel que permite entender los ámbitos de actuación en materia de hidrógeno sobre los que trabajarán los distintos órganos de administración, nacionales y regionales, durante la próxima década.

Se distinguen tres fases temporales en las que se abordarán las líneas de trabajo:

- **Fase 1. Sentar las bases del hidrógeno:** Acciones a realizar en el corto plazo (periodo inferior a 2 años), tales como definición de leyes o elaboración de estudios técnicos y planes de capacitación, con el objetivo de establecer unos cimientos sólidos para el correcto desarrollo del mercado.
- **Fase 2. Habilitar e impulsar el desarrollo del mercado:** Tareas orientadas a promover el uso del hidrógeno de bajas emisiones. Estas medidas serán llevadas a cabo en el corto/medio plazo (periodo inferior a 5 años). Las primeras medidas se enfocan en incentivar y mitigar el riesgo de los primeros participantes, mientras que las más tardías buscarán conseguir el escalado del hidrógeno a lo largo de toda la cadena de valor.
- **Fase 3. Monitorear y habilitar nuevos usos:** Acciones a realizar en el medio/largo plazo con objeto de dar seguimiento y garantizar la correcta implementación de las medidas de los periodos anteriores, así como hacer posible la entrada del hidrógeno en aquellas aplicaciones de menor madurez. Esta fase de monitoreo se considera en medio/ largo plazo ya que se tratará de acciones que se realizarán cíclicamente.

A continuación, se muestra el mapa de líneas de trabajo, algunas de las cuales afectan a distintos ejes de actuación debido al carácter transversal del hidrógeno. En los apartados siguientes se recopilan las medidas concretas dentro de cada línea.

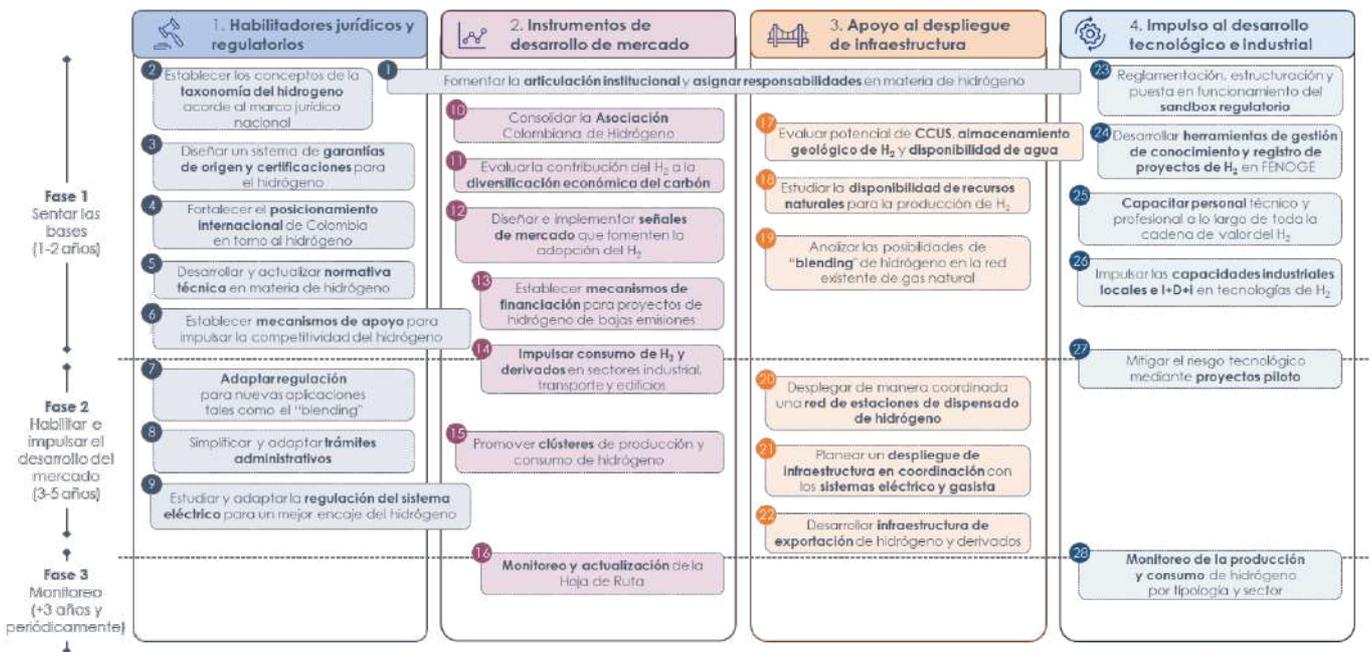


Figura 18: Líneas de trabajo para el desarrollo del hidrógeno

5.2. Habilitadores jurídicos y regulatorios

Fase 1. Sentar las bases del hidrógeno

1. Fomentar la articulación institucional y asignar responsabilidades en materia de hidrógeno

- Establecer mesas de trabajo para identificar y asignar competencias institucionales entre los distintos ministerios

En lo que concierne la organización institucional, el desarrollo de la industria del hidrógeno genera nuevas necesidades regulatorias y requiere la asignación de nuevas responsabilidades.

Debido al carácter transversal y el amplio rango de aplicaciones del hidrógeno, será crucial que la articulación tenga en cuenta todos los Ministerios relevantes tales como el Ministerio de Minas y

Energía, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Ministerio de Hacienda y Crédito Público, el Ministerio de Transporte, el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Hacienda, entre otros.

El sector energético colombiano cuenta con un marco institucional robusto, en el que el Gobierno, a través de sus Ministerios, define los objetivos estratégicos y las directrices normativas para cada sector. La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) desarrolla la planificación conjunta de largo plazo y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) regula los servicios públicos de energía eléctrica, gas combustible y combustibles líquidos.

La reciente Ley 2099 de 2021, mediante los artículos 21 y 23, abre una cláusula general de competencia al Gobierno Nacional para definir los mecanismos para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso de hidrógeno. Esto habilita un escenario multiactor, donde varias entidades del orden nacional jugarán un rol activo en la regulación y planeación del rol del hidrógeno en sus respectivos sectores.

En este contexto, se establecerán mesas de trabajo con los distintos agentes involucrados con el fin de evaluar si la organización existente en materia de energía es válida también para el sector del hidrógeno de bajas emisiones. El elemento de mayor novedad es la integración de sistemas energéticos que el hidrógeno traerá consigo. Por este motivo, la actividad de cada institución y los intercambios entre ellas deberían considerar el acoplamiento entre los sectores eléctrico y gasista, teniendo en cuenta que los cambios normativos en un sector pueden tener repercusiones en otro.

- [Articular la hoja de ruta del hidrógeno con los instrumentos de implementación de la política de cambio climático nacional, especialmente en los Planes Integrales de Gestión de Cambio Climático Sectoriales y Territoriales \(PIGCCs\)](#)

Según la ley 1931 de 2018: “Corresponde a los Ministerios que hacen parte del SISCLIMA en el ámbito de sus competencias, impartir las directrices y adoptar las acciones necesarias para asegurar el cumplimiento de la meta de reducción de gases de efecto invernadero concertadas en la CICC”, en este sentido se debe llevar a consideración de la Comisión Intersectorial de Cambio Climático la aprobación de la inclusión del hidrógeno en los diferentes PIGCCs, esto permitirá coordinar la hoja de ruta con las estrategias de carbono neutralidad y descarbonización de la economía.

2. Establecer los conceptos de hidrógeno verde y azul acorde al marco jurídico nacional

- [Consolidar las definiciones y taxonomía de hidrógeno verde y azul teniendo en cuenta las emisiones de CO₂ asociadas](#)

La Ley 2099 de 2021 aprobada en julio de 2021 moderniza la regulación actual en materia de energía, con el objetivo de lograr una transición energética efectiva y dinamizar el mercado energético. Una de las principales medidas que adopta es la reforma de la Ley 1715 de 2014, que representa la norma más relevante en Colombia en materia de fomento de fuentes no convencionales de energía (FNCE) y fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), y que contempla incentivos y beneficios fiscales para las inversiones en estas fuentes. La nueva Ley incluye al hidrógeno verde y azul como FNCER y FNCE, respectivamente.

Esta inclusión permite aplicar los beneficios e incentivos tributarios a los proyectos de hidrógeno verde y azul, y proporciona claridad y certidumbre sobre el apoyo de las administraciones públicas colombianas al desarrollo del hidrógeno de bajas emisiones.

Atendiendo a las definiciones de la Ley 2099 únicamente, el hidrógeno verde es considerado FNCER pudiendo ser producido a partir de fuentes tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar o la mareomotriz. El hidrógeno azul es considerado

FNCE y será aquel producido a partir de combustibles fósiles cuando se disponga de un sistema de captura y almacenamiento o uso de CO₂ (CCUS).

No obstante, todavía se requiere una definición más precisa para definir la categoría del hidrógeno producido mediante otras fuentes de energía renovables como la hidroeléctrica con capacidad superior a 10 MW. De acuerdo con las recomendaciones internacionales, se definirá si los certificados de origen de la fuente de producción de electricidad podrían resultar habilitadores para que los sistemas de producción de hidrógeno que cuenten con estos certificados (p. ej. proyectos con contratos bilaterales de energía hidráulica accedan a los beneficios de la Ley 2099).

Por último, se definirán los umbrales de emisiones de CO₂ para que el hidrógeno pueda ser considerado de bajas emisiones. Estos puntos son abordados en la línea de trabajo siguiente.

3. Diseñar un sistema de garantías de origen y certificaciones para el hidrógeno

- [Involucrar a Colombia en los grupos de trabajo internacionales](#)

Con objeto de aprender de la experiencia internacional, se fomentará la participación de Colombia en grupos de trabajo internacionales que incluyan representantes de distintos países. En el caso de plataformas en las que la participación está restringida a ciertos países, se tratará de incluir a Colombia como observador.

Esta involucración permite adoptar las mejores prácticas internacionales, así como el desarrollo de un sistema de garantías y certificación nacional alineado con el de los potenciales países importadores.

- [Diseñar un sistema de garantías de origen a través de mesas de trabajo con la industria y otras partes interesadas](#)

La Ley 2099 de 2021 trae consigo la definición, del hidrógeno verde y azul como FNCE y FNCE, respectivamente. Este es un primer paso para definir y clarificar la visión nacional entorno a este nuevo vector energético. Sin embargo, se considera esencial diseñar un sistema de garantías de origen o seriación que, además de tener en cuenta la ruta de producción, considere el máximo de emisiones u otros factores ambientales para la comercialización del hidrógeno como verde o azul.

Las garantías de origen y los certificados son uno de los aspectos más relevantes en la incipiente regulación del sector del hidrógeno, pues es indispensable elaborar un mecanismo que haga posible trazar con seguridad el origen y la reducción de emisiones que este vector permite alcanzar. Es necesario definir el procedimiento, los requisitos, así como el organismo responsable, para la emisión de garantías de origen. Este sistema proporcionará las señales de precio adecuadas a los consumidores finales y será la base para establecer futuros mecanismos de apoyo.

En este momento no existe un estándar internacional definido siendo el europeo el más avanzado. Por tanto, en esta fase se avanzará a nivel nacional en la asignación de responsabilidades y en la definición de los mecanismos de certificación más apropiados, los actores involucrados, el marco de gobierno y las formas mediante las cuales el esquema podría ser validado a nivel local e internacional. Esta definición se realizará en colaboración con la industria y demás agentes relevantes a través de mesas de trabajo específicas.

- [Desarrollar una herramienta de monitoreo del sistema de garantías de origen y certificaciones](#)

Además de establecer un esquema de garantías de origen y certificación de hidrógeno, se deberá desarrollar un sistema que garantice un correcto monitoreo, reporte y verificación. Este sistema

deberá estar coordinado con los sistemas de Monitoreo, Reporte y Verificación existentes para evaluar la reducción de emisiones de CO₂.

4. Fortalecer el posicionamiento y cooperación internacional de Colombia en torno al hidrógeno

- Explorar acuerdos internacionales de colaboración en torno al hidrógeno

Se considera esencial establecer acuerdos internacionales con otros países, tanto de carácter bilateral como multilateral, que tendrán por objetivo crear alianzas de cooperación en materia de hidrógeno. En una primera etapa los acuerdos se enfocarán en el intercambio de conocimiento, tecnología y experiencias, para posteriormente explorar el co-desarrollo y la co-inversión en proyectos de consumo local y la exportación de hidrógeno o derivados.

Apoyándose en el Ministerio de Relaciones Exteriores y la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional, se utilizará la red actual de acuerdos comerciales de Colombia para explorar sinergias y oportunidades de colaboración. Se incentivará el diálogo con países cercanos para impulsar la cooperación regional y el posicionamiento de Latinoamérica en materia de hidrógeno.

- Fomentar la participación en foros y comités internacionales de hidrógeno

Se continuará promoviendo la participación de Colombia en mesas redondas con instituciones internacionales como las que ya se han llevado a cabo con la Asociación Internacional de la Energía (IEA), la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Consejo Mundial de la Energía (WEC) o la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA).

La integración del país en plataformas internacionales que buscan acelerar la innovación, promover políticas y compartir experiencias en materia de hidrógeno será una prioridad para fomentar la adopción nacional de las mejores prácticas.

Se impulsará la participación de instituciones públicas y empresas privadas en los principales grupos de trabajo internacionales en materia de hidrógeno.

Además del impulso a la participación en foros, se buscará la inclusión de empresas colombianas en los comités técnicos de desarrollo de normativa internacional y estándares de hidrógeno.

- Desarrollar campañas de divulgación del recurso renovable de Colombia y el potencial del hidrógeno verde local

Se dará a conocer al exterior el alto potencial renovable de Colombia con fines de atraer a empresas y capital extranjero para desarrollar proyectos de hidrógeno en el país. Regiones como La Guajira disponen de condiciones excepcionales para la generación de hidrógeno renovable.²⁹

5. Desarrollar y actualizar normativa técnica en materia de hidrógeno

- Revisar la normatividad nacional actual mediante grupos de trabajo e identificar los usos donde se requiera incorporar nueva normativa técnica

La normatividad técnica actual no está diseñada para el uso del hidrógeno como vector energético. El hidrógeno en la actualidad está regulado como una sustancia peligrosa, resultando

²⁹ La Guajira cuenta con un potencial de al menos 25 GW de capacidad eólica onshore y 45 GW solar, un a velocidad media del viento de 9 m/s a 80m de altura (doble del promedio mundial) y una radiación solar constante durante todo el año, con un valor de 6 kW/m² (60% mayor que el promedio mundial). Fuente: UPME, IDEAM

esta regulación insuficiente y desactualizada tecnológicamente para las nuevas aplicaciones del hidrógeno.

Resulta fundamental revisar y adaptar la normativa existente para permitir el despliegue seguro de nuevas aplicaciones. Para ello se propondrá la creación de grupos de trabajo que analicen el estado de la reglamentación en materia de hidrógeno, y que elaboren propuestas de disposiciones generales o normas que se consideren necesarias para afianzar su implementación. El análisis será realizado abarcando todos los eslabones de la cadena de valor del hidrógeno desde su producción hasta el consumo.

Los grupos de trabajo estarán formados por miembros expertos tales como representantes del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), representantes del sector privado, universidades, empresas privadas o la Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI).

- **Adoptar estándares internacionales en la normativa técnica del hidrógeno en Colombia**

En paralelo a la medida anterior, se analizarán y adoptarán los estándares internacionales fijados por instituciones tales como la National Fire Protection Association (NFPA), la American Society of Mechanical Engineers (ASME), la Organización Internacional de Normalización (ISO), el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI), la Asociación europea de gases industriales o la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE). Estas instituciones han desarrollado códigos y estándares de aplicación para el hidrógeno cuya adopción simplifica el desarrollo de normatividad, por lo que se promoverá la homologación de los certificados de conformidad que ya se otorguen en otros países.

Además, se impulsará la colaboración de las empresas nacionales en los foros internacionales y comités técnicos encargados de desarrollar nueva normativa, como pueden ser reglamentos específicos para el uso del hidrógeno en la industria minera.

6. Establecer mecanismos de apoyo para impulsar la competitividad del hidrógeno

- **Implementar medidas de apoyo a la producción de hidrógeno y derivados de bajas emisiones**

El elevado costo de producción actual es una de las principales barreras al desarrollo de proyectos de hidrógeno de bajas emisiones. Por este motivo, es necesario la identificación de incentivos que den seguridad a los inversores y permitan impulsar los primeros proyectos a escala piloto como paso previo al desarrollo de proyectos a escala industrial.

La Ley 2099 de 2021 incentiva la inversión en toda la cadena de valor del hidrógeno verde y azul, pues extiende las disposiciones del capítulo III de la Ley 1715 de 2014 a estos tipos de hidrógeno y, además, mejora los incentivos aplicables a las FNCE. Por tanto, las inversiones, los bienes, equipos y maquinaria destinados a la producción, almacenamiento, acondicionamiento y distribución gozarán de los beneficios de deducción en el impuesto de renta, exclusión de IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada. Cabe destacar que al incentivar la producción de hidrógeno de bajas emisiones, se incentiva también la producción de derivados del mismo tales como el amoníaco o el metanol, pues el hidrógeno representa el componente de mayor costo.

El Gobierno Nacional evaluará, a medida que avance el desarrollo del mercado, si los incentivos establecidos son suficientes o se requiere un impulso mayor. En caso de considerarse necesario, la Ley 2099, específicamente los artículos 21 y 23, permite la definición de otros mecanismos o incentivos de apoyo para promover la innovación y el desarrollo de la industria del hidrógeno. Las medidas irán destinadas a incentivar el hidrógeno verde o azul frente al de origen fósil, o sobre aquel cuyo origen no se pueda trazar.

- [Implementar medidas de apoyo a la demanda nacional de hidrógeno](#)

La falta de nueva demanda constituye otra clara barrera al desarrollo de proyectos de hidrógeno tanto de producción como de infraestructura, dado que, para que los proyectos sean viables económicamente deben existir usos finales con casos de negocio viables. Las medidas orientadas a fomentar la demanda proporcionan un enfoque tecnológico más neutral, que podría ser más resiliente hacia innovaciones en la oferta y permitir un desarrollo temprano de esta nueva industria.

Los incentivos de la Ley 2099 anteriormente mencionados para la producción son también de aplicación para los usos finales del hidrógeno. El Gobierno evaluará si se precisan mayores incentivos para que tenga lugar la transición desde las tecnologías basadas en combustibles fósiles sin abatimiento de emisiones a tecnologías de hidrógeno de bajas emisiones, como ya se plantea legalmente en el sector de movilidad a través de la Ley 1964 de 2019. Asimismo, es fundamental la colaboración de las regiones y las ciudades para estimular la demanda de hidrógeno.

A nivel de inversión directa, la Ley 2099 extiende el ámbito de actuación del Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) a la financiación y/o ejecución de proyectos viables en cualquier eslabón de la cadena del valor del hidrógeno de bajas emisiones.

- [Definir los bienes, equipos y maquinaria de hidrógeno que puedan ser certificados para acceder a los beneficios de la Ley 2099 de 2021](#)

La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) debe certificar los proyectos de FNCE para que quienes inviertan en estos accedan a los incentivos tributarios y arancelarios de la Ley 2099.

Con la inclusión del hidrógeno verde y azul como FNCE, se establece que las inversiones, los bienes, equipos y maquinaria destinados a hidrógeno verde y azul podrán gozar de los beneficios de deducción en el impuesto de renta, exclusión de IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada, cuando la UPME los certifique.

Para dar cumplimiento a este nuevo rol de la UPME, será necesario establecer una lista de bienes, equipos y maquinaria para la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, reelectrificación, investigación y uso final del hidrógeno verde o azul, así como las tecnologías de captura, almacenamiento y uso de CO₂.

- [Actualizar la guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 2099](#)

La UPME se encargará de actualizar la guía práctica desarrollada para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014³⁰ con los nuevos incentivos indicados por la nueva Ley 2099 de 2021, que incluyen al hidrógeno verde y azul.

Fase 2. Habilitar y fomentar el desarrollo del mercado

7. Adaptar regulación para nuevas aplicaciones tales como el “blending”

- [Revisar y actualizar el RUT para permitir el “blending”](#)

El transporte de gas natural en Colombia está regulado por Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT), el cual, a pesar de no prohibir explícitamente la inyección de hidrógeno, establece unos parámetros mínimos de calidad del gas que resultarían imposibles de cumplir si se mezclase hidrógeno en la red.

Por este motivo, en el caso de considerarse admitir mezclas de hidrógeno en la red gasista será necesario modificar el RUT. Este proceso de rectificación podría ser iniciado por el Consejo Nacional

³⁰ UPME (2016): *Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014*

de Operación de Gas Natural (CNO Gas) o por la CREG, quienes, tras revisar la experiencia nacional e internacional, podrán hacer propuestas de reforma, teniendo en cuenta las observaciones de todos los agentes involucrados.

8. Simplificar y adaptar trámites administrativos

- [Revisar los permisos y procedimientos para la ejecución de proyectos de hidrógeno incluyendo aspectos ambientales y usos de suelo](#)

Actualmente, la producción y manejo de hidrógeno es considerada una actividad industrial dado que el hidrógeno se clasifica como una mercancía o sustancia peligrosa. Esto implica que las actividades relacionadas con el hidrógeno están sometidas a rigurosas evaluaciones de impacto ambiental independientemente de la fuente de producción.

En este contexto, y considerando el impacto ambiental positivo del hidrógeno de bajas emisiones, se llevará a cabo una revisión de los permisos y trámites necesarios para la puesta en marcha y operación de proyectos, a fin de facilitar su desarrollo. En materia ambiental, en este punto es importante mencionar que al hidrógeno verde y azul son catalogados como FNCE y FNCE respectivamente, les es aplicable el régimen especial establecido en la ley 1715, donde la Autoridad Ambiental Nacional (ANLA) y Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) están llamadas a establecer un ciclo de evaluación rápido para proyectos de FNCE. Se recomienda que estas autoridades ambientales realicen estudios para cuantificar los impactos ambientales de estos proyectos, analizar los trámites ambientales que requerirán y eliminar los trámites innecesarios para agilizar la obtención de permisos y licencias ambientales. Para lograr una simplificación y ejecución efectiva de los trámites se fortalecerá la capacidad técnica de los funcionarios de las autoridades ambientales a través de procesos de formación.

Asimismo, se recomienda que los municipios incluyan dentro de los Esquemas de Ordenamiento Territorial los lugares dentro de su territorio donde se pueden establecer proyectos de hidrógeno. Recordemos que la Ley 1715 de 2014 declara las actividades de producción y utilización de FNCE como de utilidad pública e interés social, por lo que tiene primacía en lo referente a ordenamiento territorial y esta declaratoria, gracias a la Ley 2099 de 2021, es extensible a proyectos de hidrógeno verde y azul. Se recomienda que las entidades territoriales analicen las normas básicas de edificación y usos de suelo de una manera que favorezcan el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y azul en su territorio.

- [Reducir los trámites administrativos para proyectos de hidrógeno de bajas emisiones](#)

Se promoverán medidas regulatorias que simplifiquen y faciliten el desarrollo de proyectos de hidrógeno azul o verde. Entre estas medidas se encuentran la aprobación conjunta de proyectos, la simplificación de trámites para la construcción de hidroductos o acondicionamiento de gasoductos existentes.

Para el caso particular del hidrógeno verde en el que es preciso abordar el desarrollo de proyectos conjuntos de FNCE para la producción de electricidad (p. ej. eólica y/o solar) y de electrólisis para la producción de hidrógeno, se promoverá un abordaje conjunto de su tramitación. Este nuevo enfoque podrá reducir retrasos en el procedimiento administrativo, el cual representa una barrera para la inversión y el despliegue de las FNCE.

Estas adaptaciones requieren una modificación de la regulación a nivel sectorial, la cual se llevará a cabo evitando poner en riesgo la sostenibilidad financiera del sistema eléctrico y gasista actual.

9. Adaptar la regulación del sistema eléctrico para un mejor encaje con la producción de hidrógeno

- [Analizar la participación de electrolizadores en servicios de flexibilidad de red](#)

Se revisará la regulación del sistema eléctrico en función de un análisis que evalúe los costos y beneficios de la provisión de servicios de flexibilidad (servicio de AGC o participación en el cargo por confiabilidad) por parte de los electrolizadores siempre que la tecnología cumpla con los requisitos técnicos exigidos.

Los electrolizadores pueden contribuir a aumentar la resiliencia del sistema eléctrico ante un escenario de alta penetración de FNCER no gestionables, al mismo tiempo que abaratan el costo final de producción de hidrógeno al percibir ingresos adicionales.

- [Analizar la reducción de costos de la electricidad en la producción de hidrógeno](#)

Para los sistemas de producción de hidrógeno mediante electrólisis que cuenten con una certificados de origen que acrediten una baja huella de CO₂, se evaluará la posibilidad de eximir del pago de ciertos costos del sistema eléctrico a fin de incrementar su competitividad.

5.3. Instrumentos de desarrollo de mercado

Fase 1. Sentar las bases del hidrógeno

10. Consolidación de la Asociación Colombiana de Hidrógeno y otros organismos relacionados con hidrógeno

- [Fortalecer el tejido industrial mediante la colaboración de actores relevantes](#)

La consolidación de asociaciones sectoriales tales como Asociación Colombiana de Hidrógeno es necesaria para promover e impulsar el desarrollo y el crecimiento de las tecnologías del hidrógeno a nivel nacional y poner en valor y fortalecer el tejido industrial del país.

Mediante la participación de socios de toda la cadena de valor (academia, promotores de proyectos de energías renovables, ingenierías, fabricantes de equipos, empresas de transporte, industrias, etc.) será posible construir un entorno favorable y lograr una industria nacional fuerte con visión internacional.

Las asociaciones han de ser un punto de encuentro entre empresas, instituciones, centros tecnológicos y universidades con actividades relacionadas con el hidrógeno. Uno de los principales objetivos será compartir mejores prácticas y promover leyes y normativa para la regulación del hidrógeno. Además, se buscarán acuerdos con asociaciones de otros ámbitos que presenten sinergias y se elaborarán grupos de trabajo para detectar y solventar brechas que frenen el desarrollo del mercado.

11. Evaluar la contribución del hidrógeno a la diversificación económica del carbón

- [Analizar la viabilidad de transición de plantas de carbón hacia producción de hidrógeno azul](#)

La reestructuración de la demanda global de carbón debido a los objetivos de descarbonización, implican una reducción de su consumo en algunos mercados (principalmente en Europa y Norteamérica) e impactarán negativamente en la demanda y los precios de las exportaciones colombianas.

En este contexto, se promoverá la realización de estudios de factibilidad para evaluar la viabilidad comercial de la producción de hidrógeno mediante la gasificación del carbón nacional. El hidrógeno azul a partir de carbón se presenta como una posible alternativa para la transformación de las compañías mineras hacia la utilización más sostenible de los recursos mineros del país.

- **Desarrollar un plan de transformación del capital humano para acelerar el despliegue del hidrógeno**

La descarbonización de la economía conlleva la creación de nuevos puestos de trabajo que requerirán conocimientos y competencias específicos. El aprovechamiento del capital humano existente en sectores impactados por el proceso de transición energética y la actualización de sus conocimientos y competencias será un objetivo para el gobierno nacional, agentes sociales, empresas y academia y habilitará una transición justa.

Se evaluará el rol del hidrógeno como herramienta de transformación, permitiendo la reubicación de trabajadores en los sectores de las energías renovables o el hidrógeno. Para ello será necesario una colaboración con el sector privado para detectar las necesidades de personal en estos nuevos sectores y formar a los profesionales en tecnologías tales como la solar, la eólica, la electrólisis o la captura y almacenamiento de CO₂.

12. Diseñar e implementar señales de mercado que fomenten la adopción del hidrógeno

- **Diseñar un sistema de precio a las emisiones e implementar el Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión**

Un elemento clave para la creación de una demanda interna de hidrógeno de bajas emisiones es la fijación de un precio al CO₂ que refleje las externalidades del uso de combustibles fósiles. Este mercado de emisiones, previsto en forma de cupos transables de emisión, ya se encuentra en fase de elaboración bajo las competencias del Ministerio de Medioambiente y Desarrollo Sostenible.

Se constituirán mesas técnicas con representantes de dicho Ministerio y otros actores públicos y privados para discutir una tarificación justa a las emisiones. Además, se tendrán en cuenta las experiencias de otras geografías, así como las recomendaciones internacionales de instituciones como el Fondo Monetario Internacional (FMI) o la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) sobre tasas efectivas al carbono.

El sistema de comercio de emisiones y la monitorización de las garantías de origen y certificaciones, estarán sincronizados con el Sistema MRV de la Comisión intersectorial de cambio climático, instrumento responsable de identificar las inversiones y proyectos que atienden a las metas nacionales de cambio climático.

- **Evaluar otros mecanismos para nivelar las condiciones de mercado de carbono**

Se evaluarán mecanismos adicionales que permitan nivelar las condiciones del mercado de carbono como la identificación y adopción de incentivos en el mercado de cupos transables de las tecnologías CCUS u otro mecanismo que incentive el cumplimiento de la NDC 2020, la habilitación de las tecnologías CCUS como actividad para alcanzar la carbono neutralidad y la evaluación de la modificación del impuesto al carbono.

13. Establecer mecanismos de financiación para proyectos de hidrógeno de bajas emisiones

- **Diseñar nuevos instrumentos de financiación público-privada**

La producción de hidrógeno de bajas emisiones requiere inversiones iniciales elevadas, tanto si se trata de hidrógeno verde como azul. A pesar de que, en general, las tecnologías de captura de

CO₂, generación renovable y electrolizadores pueden considerarse en fase avanzada de desarrollo, aún no son totalmente maduras en términos de costos esperándose reducciones en los próximos años. Por este motivo, se considera esencial desarrollar nuevos mecanismos de financiación que aceleren el despliegue de estas tecnologías y que se ajustarán en cada momento a los avances que, tanto a nivel global como local, se espera ocurran en los próximos años con el hidrógeno a nivel técnico, social, económico y ambiental entre otros.

Además de los fondos del FENOGÉ y los incentivos tributarios vigentes, se evaluarán otros instrumentos como préstamos de bajo interés, emisión de bonos verdes por parte de las empresas nacionales o rondas de financiamiento público exclusivo para proyectos de hidrógeno de bajas emisiones. Este financiamiento buscará apoyar a empresas y consorcios nacionales e internacionales para el desarrollo de proyectos en el país.

Además de los mecanismos existentes, la Ley 2099 autoriza al Gobierno Nacional a financiar, con aportes del Presupuesto General de la Nación y el Sistema General de Regalías, la participación de las entidades territoriales en los proyectos de generación, distribución, comercialización de FNCER, entre las cuales se incluye el hidrógeno verde.

- [Atraer financiación internacional](#)

La cooperación internacional es considerada una herramienta fundamental para incentivar la inversión en proyectos de hidrógeno en Colombia. Por este motivo, se promoverá la creación de consorcios formados por empresas nacionales y extranjeras.

Se aprovecharán las oportunidades otorgadas por instituciones y programas multilaterales e internacionales. Se considera crucial apalancarse en estas instituciones e iniciativas para poder desarrollar los estudios y proyectos piloto de hidrógeno que se requieren a nivel nacional.

La cooperación internacional se apoyará en instituciones nacionales como el Ministerio de Relaciones Exteriores, la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional de Colombia y ProColombia, las cuales jugarán un papel fundamental para poner en valor la red de acuerdos comerciales de Colombia y establecer colaboraciones con embajadas y gobiernos en otros países.

Fase 2. Habilitar y fomentar el desarrollo del mercado

14. Impulsar el consumo de hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados en los sectores industrial, transporte y edificios

- [Fomentar el consumo de hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados mediante la realización de planes de penetración en la industria](#)

El uso actual del hidrógeno en Colombia se concentra en sectores industriales como el de refinación, los fertilizantes y la industria química. Debido a la compatibilidad de la infraestructura, que minimiza la inversión necesaria para la adopción del hidrógeno de bajas emisiones, se consideran estos sectores como los más propensos a la utilización de hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados en el corto/medio plazo. No obstante, el hidrógeno y sus derivados tienen cabida en muchas otras industrias donde pueden ser utilizados como materia prima o para la producción de calor.

Se espera que el mercado del hidrógeno se dirigirá fundamentalmente hacia aquellos sectores donde no existan otras alternativas para la descarbonización. Con foco en estos sectores, se llevarán a cabo mesas técnicas con asociaciones, representantes del sector privado y ministerios, especialmente el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo y el Ministerio de Transporte, a fin de evaluar el establecimiento de objetivos de penetración de hidrógeno de bajas emisiones en algunos sectores industriales. Estas metas de uso de hidrógeno de bajas emisiones irán acompañadas de

mecanismos de apoyo que faciliten la inversión privada, protegiendo en todo momento la competitividad industrial del país.

Por último, se impulsará la elaboración de estudios por subsector, que permitan entender y diseñar estrategias de descarbonización y carbono-neutralidad a largo plazo. Por ejemplo, mientras que en el sector residencial hay algunos equipos certificados para el uso de mezclas de hidrógeno y metano, el sector industrial destaca por contar con un gran número de aplicaciones que no han sido evaluadas en detalle. Por tanto, se considera que algunos procesos que utilizan gas natural podrían necesitar ajustes si se comenzase a inyectar hidrógeno en la red gasista.

- Realizar planes de penetración de hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados en el transporte terrestre, marítimo y aéreo

Se prevé una gradual aceleración en la introducción de hidrógeno y sus derivados en el transporte propiciada por el crecimiento en la demanda energética y a los, cada vez más exigentes, objetivos de descarbonización. El hidrógeno de bajas emisiones puede ser usado en forma de gas o también puede ser transformado en combustibles líquidos como amoníaco, metanol y combustibles sintéticos que pueden ser utilizados en para alcanzar la carbono-neutralidad de los diferentes modos de transporte.

En lo relativo al transporte terrestre, el hidrógeno contribuirá a la Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible de Colombia, ayudando a la mejora de la calidad del aire, evitando las emisiones de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas e hidrocarburos sin quemar. Se prevé una importante contribución en los sistemas de transporte público, el transporte pesado de mercancías y en los vehículos ligeros de uso intensivo como los taxis.

En este proceso es crucial la participación de los gobiernos locales que, a través de la renovación de las flotas de transporte público, pueden impulsar la adopción del hidrógeno y el despliegue de la necesaria infraestructura de recarga. Además, se evaluará la incorporación de otros incentivos a la demanda de hidrógeno en el transporte como una disminución en las tasas impositivas o subvenciones en la adquisición de vehículos de hidrógeno.

En el transporte aéreo, fluvial y marítimo se plantea una posible coordinación con entidades y reguladores internacionales como la Organización Marítima Internacional (IMO) o la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) para realizar un plan de descarbonización de estos sectores a nivel nacional. Con respecto al transporte marítimo, la IMO ha adquirido un compromiso de reducción del 50% de las emisiones a 2050 respecto a los niveles de 2008. La IATA establece una reducción de emisiones del 50% a 2050 con respecto a los niveles de 2005.

- Identificar barreras para el consumo de hidrógeno en sectores residencial y terciario

El sector de los edificios, tanto residencial como terciario, podrá ser un consumidor de hidrógeno bien mediante el uso de pilas de combustible de pequeña escala para micro-cogeneración o mediante la combustión de hidrógeno en los equipos conectados a la red de gas natural para producción de calor. Mientras que el primer caso se considera poco probable por sus altos costos, la inyección de hidrógeno en la red de gas es percibida como una opción transitoria que permite fomentar el consumo de hidrógeno de bajas emisiones sobre todo en los grandes núcleos urbanos, donde se espera un rápido escalado de la demanda.

No obstante, el impulso en estos sectores requiere la realización previa de estudios que determinen las consideraciones técnicas, de seguridad y de disponibilidad de equipos adaptados para la operación con mezclas de hidrógeno.

- Desarrollar un programa de socialización abierta en materia de hidrógeno acercando estas tecnologías a las comunidades

El hidrógeno es un gas de difícil manipulación cuyo rango de aplicaciones actuales se limita a unos pocos sectores industriales. Sin embargo, la reducción de costos y el desarrollo de tecnologías permitirán su uso en nuevos sectores y le convertirán en un pilar de la transición energética.

No obstante, actualmente existe un alto grado de desconocimiento del hidrógeno, tanto social como profesional, sobre sus posibilidades de aplicación y ventajas asociadas, lo que dificulta la aceptación del mismo como una alternativa sostenible y segura.

Se promoverán estrategias y campañas de comunicación con la ciudadanía y potenciales industrias y empresas consumidoras, con el fin de acercar el potencial y beneficios del hidrógeno a toda la sociedad colombiana, reduciendo el riesgo percibido y dando a conocer las oportunidades de descarbonización e industrialización que presenta.

Se tendrá un diálogo temprano y cercano con grupos de interés con el fin de conocer el potencial en las distintas regiones y los beneficios, identificando también los riesgos y posibles medidas de acción a implementar. Especialmente, se abrirán diálogos con las comunidades a fin de resolver cuestiones como el empleo local, la compatibilidad predial, aspectos ambientales y sociales.

15. Promover clústeres de producción y consumo de hidrógeno

- **Identificar áreas que aglomeren potenciales consumidores y productores de hidrógeno**

Se llevarán a cabo talleres y mesas de trabajo con la participación de administraciones públicas departamentales, las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), potenciales empresas consumidoras de hidrógeno y promotores de proyectos con el objetivo de definir aquellas regiones con capacidad para convertirse en clústeres de hidrógeno.

Se consideran clústeres aquellas áreas del país que, por su desarrollo industrial o su cercanía a puertos u otras infraestructuras relevantes para la cadena de suministro del hidrógeno, demandarían grandes volúmenes de hidrógeno mediante el agregado de consumos.

Entre las regiones a considerar destacan: Barranquilla y Cartagena (con el complejo industrial de Mamonal), Bogotá, Medellín, Bucaramanga y zonas de Manizales, Pereira, Armenia, Ibagué y Barrancabermeja, entre otros. No obstante, todos los territorios de Colombia podrán ser considerados si administraciones y empresas permiten agrupar una demanda suficiente. Además, se evaluará la posibilidad de promover la creación de estos clústeres en zonas que se estén viendo afectadas negativamente por el proceso de transición energética, como pueden ser, por ejemplo, las regiones mineras.

- **Fomentar la cooperación regional entre empresas y agentes públicos para obtener economías escala**

Una vez se identifiquen las regiones y actores interesados en el hidrógeno, se impulsará el desarrollo de proyectos de tamaño relevante, que puedan beneficiarse de economías de escala y facilitar un suministro de hidrógeno de bajas emisiones con costos competitivos.

No obstante, se debe tener en cuenta que muchas tecnologías fundamentales para la economía del hidrógeno necesitan desarrollarse aún y existen riesgos significativos a su implementación. Por este motivo, se impulsará la colaboración público-privada con el fin de facilitar la movilización de las inversiones privadas que se necesitan para su despliegue inicial.

Fase 3. Monitorear el desarrollo y permitir nuevos casos de uso

16. Monitorear y actualizar la Hoja de Ruta del Hidrógeno

- Revisar la evolución tecnológica y la consecución de los objetivos del país

Al encontrarse la industria del hidrógeno de bajas emisiones en un estado de desarrollo incipiente, es de esperar que tengan lugar cambios relevantes en el futuro a nivel de tecnologías y mercados, debiendo adaptarse la política energética.

Será necesario la revisión periódica de la Hoja de Ruta en ciclos suficientemente cortos. Esta revisión se realizará con una frecuencia mínima de 3 años, pudiendo llegar hasta una revisión anual si se considera necesario debido a cambios y tendencias del mercado. Estas revisiones se apalancarán en estudios técnicos especializados y permitirán determinar el grado de implantación de las medidas, la cuantificación de su impacto y el cumplimiento de las metas establecidas.

5.4. Apoyo al despliegue de infraestructura

Fase 1. Sentar las bases del hidrógeno

17. Evaluar el potencial de CCUS, almacenamiento geológico de hidrógeno y disponibilidad de agua

- Realizar estudios para determinar el potencial de almacenamiento geológico de CO₂

De acuerdo con la Ley 2099 de 2021, el Gobierno Nacional desarrollará la reglamentación necesaria para la promoción y desarrollo de las tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de CO₂ (CCUS). En este contexto, se considera esencial estudiar y validar las áreas geográficas y las tecnologías más adecuadas para impulsar el desarrollo de hidrógeno azul. Por este motivo, se fomentarán los estudios destinados a analizar, por un lado, el potencial geológico para el almacenamiento de CO₂ en yacimientos fósiles agotados, acuíferos, cavernas de sal u otros contenedores naturales y, por otro lado, las tecnologías más eficientes para la captura e inyección. Además, se analizará la valorización del CO₂ en procesos industriales como opción para aumentar la competitividad del hidrógeno de bajas emisiones. Junto con los estudios de capacidad, será necesario también capacitar a los futuros profesionales del área en colaboración con las universidades y el Ministerio de Ciencias.

La captura y almacenamiento de CO₂ es crítica para el desarrollo del hidrógeno azul y un desarrollo tardío impactaría en los tiempos de despliegue del hidrógeno azul como puente hacia el hidrógeno verde. El hidrógeno azul podría ser sustituido directamente por el verde en caso de retrasarse su desarrollo al ser el hidrógeno verde potencialmente más competitivo en el largo plazo.

- Realizar estudios para determinar el potencial de almacenamiento geológico de H₂

En línea con la medida anterior, los mismos estudios realizados para el almacenamiento geológico de CO₂ permitirán evaluar las posibilidades y las localizaciones más adecuadas para el almacenamiento geológico de hidrógeno. Este almacenamiento a gran escala permitiría disponer de grandes reservas energéticas renovables de carácter estacional, que ayudarán a mitigar el impacto de fenómenos climatológicos como El Niño o La Niña.

- Evaluación del estrés hídrico en Colombia y fomento del desarrollo e implementación de tecnologías de desalinización

En colaboración con universidades, laboratorios y entidades públicas, se llevarán a cabo estudios regionales de estrés hídrico que pudiesen condicionar la producción de hidrógeno verde a gran escala.

Se impulsará la investigación ya iniciada por universidades y grupos de investigación de todo el país que promueven el uso y desarrollo de tecnologías de desalinización. Estas tecnologías permitirán por un lado acabar con la escasez de agua para el consumo de las comunidades locales y, por otro lado, disponer del agua necesaria para la producción de hidrógeno mediante electrolisis.

18. Estudiar la disponibilidad de recursos naturales para la producción de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia

- **Cuantificar el potencial de tecnologías solar y eólica (onshore y offshore) en los distintos departamentos de Colombia**

Se impulsará el desarrollo de herramientas para la toma de decisiones en materia de recurso renovable solar y eólico, tales como los atlas climatológicos y mapas de radiación y viento realizados por IDEAM. Estos estudios facilitarán la identificación de las zonas de recurso renovable óptimo y estarán disponibles para facilitar a las empresas el desarrollo de proyectos.

En lo relativo al potencial renovable, actualmente se conoce de potencial en la región de La Guajira, donde el potencial eólico terrestre es de más 20 GW y solar de más de 40 GW³¹. Aunque La Guajira es la región que presenta el mejor recurso renovable y, en consecuencia, el costo nivelado del hidrógeno más competitivo, el análisis y desarrollo del potencial de otras regiones permitirá abastecer el mercado nacional y exportaciones en el largo plazo, además de disminuir los costos de transporte al producir el hidrógeno en zonas más próximas a su consumo.

En este contexto, se fomentarán estudios para cuantificar el potencial renovable en otras regiones, teniendo en cuenta también nuevas tecnologías como la eólica off-shore, con el objetivo de determinar el potencial de producción de hidrógeno verde total. Esto permitiría tomar las decisiones adecuadas con respecto al balance entre la generación de electricidad y la producción de hidrógeno destinada al consumo nacional y con fines de exportación.

- **Cuantificar el potencial de otras tecnologías renovables no convencionales**

Se estudiará el potencial en Colombia de otras tecnologías FNCER para la producción de hidrógeno verde. Para ello se realizarán estudios del subsuelo para determinar las zonas con potencial geotérmico y se evaluará la disponibilidad de biomasa en las distintas regiones. El uso de estas tecnologías como complemento a las tecnologías solar y eólica en la producción de hidrógeno verde dependerá del recurso disponible y de la viabilidad económica y operativa de cada proyecto.

- **Evaluar el potencial de las centrales hidroeléctricas para producir hidrógeno renovable**

Colombia es uno de los países con mejor recurso hídrico de Latinoamérica y cuenta 56 GW de potencial de proyectos hidráulicos sin embalses³². Por ello, se analizará la viabilidad de destinar parte de la energía hidroeléctrica para la producción de hidrógeno renovable aprovechando así el potencial hídrico del país. Será necesario evaluar en cada momento las necesidades eléctricas y la confiabilidad de suministro considerando tanto la infraestructura existente como los proyectos de nuevas centrales hidroeléctricas previstos para la próxima década.

- **Evaluar el impacto del hidrógeno azul en el abastecimiento de gas natural de Colombia**

³¹ Ministerio de Minas y Energía (2018), *Política Pública para el Sector Eléctrico*

³² UPME (2015), *Atlas. Potencial Hidroenergético de Colombia*

El hidrógeno azul aparece como una herramienta transitoria para una descarbonización temprana, pero cuya producción precisa del consumo de combustibles fósiles, bien sea carbón o gas natural.

Mientras que Colombia es un país con grandes reservas de carbón (más de 4.500 Mt³³), las reservas de gas natural son menores (3.000 giga pies cúbicos³⁴). Por este motivo, se evaluará la viabilidad de desarrollar un suministro local de gas natural que pueda ser dedicado a la producción de hidrógeno azul, siempre y cuando esta nueva demanda gas natural no comprometa el abastecimiento para otros usos.

19. Analizar las posibilidades de “blending” de hidrógeno en la red existente de gas natural

- **Determinar el porcentaje de mezcla de hidrógeno admisible por la red de gas**

La experiencia internacional muestra el “blending” como una herramienta viable para fomentar la producción de hidrógeno, valorizar la infraestructura gasista existente y disminuir costos de transporte. Con el fin de evaluar las opciones de “blending” del país, se llevarán a cabo análisis regionales, en colaboración con las empresas gasistas, para determinar los volúmenes máximos de hidrógeno admisibles por la red colombiana.

Se analizarán las necesidades de adaptación de la red de gas (capacidad adicional de compresión, revestimiento interior de las tuberías, adecuación de las estaciones de medición, etc.) para permitir el “blending” sin comprometer la calidad de suministro y la fiabilidad de la infraestructura. Esto podrá llevar a la eventual modificación del RUT, Resolución CREG 071 de 1999, como se indicó en la línea de trabajo 7 sobre la eliminación de barreras regulatorias.

Los análisis partirán de las experiencias y mejores prácticas internacionales, las cuales muestran que la red existente puede llegar a tolerar mezclas de hidrógeno del 5-10% sin necesidad de modificaciones relevantes, y se buscará la cooperación con otros países más avanzados en la materia para simplificar los pilotos a realizar, ahorrar costos y acortar tiempos. Además, deberá realizarse un inventario de los diferentes elementos de las redes existentes susceptibles de verse afectados por la presencia de hidrógeno de cara a definir un plan de actualización.

Fase 2. Habilitar y fomentar el desarrollo del mercado

20. Desplegar de manera coordinada una red de estaciones de dispensado de hidrógeno

- **Desarrollar una legislación específica para hidrogeneras**

Recientemente el Ministerio de Minas y Energía expidió la Resolución 40223 del 9 de julio de 2021, donde establece las condiciones mínimas de estandarización y de mercado para la implementación de infraestructura de recarga para vehículos eléctricos. Sin embargo, esta resolución solo hace referencia a los vehículos puramente eléctricos. En lo relativo a los vehículos de pila de combustible, el Ministerio deberá expedir reglamentación técnica que tenga en cuenta las características específicas de las infraestructuras de dispensado de hidrógeno.

El Ministerio expedirá la reglamentación de acuerdo con la competencia que le otorga el artículo 9 de la Ley 1964 de 2019 y el artículo 6 de la ley 1715 de 2014. Se concretarán los requisitos administrativos y se establecerán los permisos necesarios para su construcción y gestión. Para tal fin, se tomarán como referencia las normas internacionales existentes en materia de hidrogeneras tales como las ISO 13984, ISO 17268, ISO 19880-1, SAE J26201 o SAE J2799.

- **Planear y monitorear el desarrollo de infraestructura de recarga de hidrógeno**

³³ Agencia Nacional de Minería (2021)

³⁴ Ministerio de Minas y Energía (2021)

La falta de infraestructura de recarga de hidrógeno es una barrera para iniciar el despliegue de la movilidad cero emisiones con hidrógeno. Por otro lado, la falta de vehículos propulsados por hidrógeno desincentiva la inversión en estaciones de dispensado por su difícil rentabilización.

Por este motivo, se considera esencial apoyar el despliegue de infraestructura de recarga de hidrógeno para su uso como combustible y hacerlo de manera coordinada con el despliegue esperado de las flotas, así como con el despliegue de infraestructura de recarga eléctrica para evitar incurrir en duplicidades y sobrecostos.

Se planificará una red de al menos 20 estaciones de dispensado de hidrógeno de acceso público por cada 1000 vehículos de pila de combustible. Se tratará de aprovechar la red existente de estaciones de servicio, principalmente aquellas situadas en lugares fácilmente accesibles, y se repartirán por las zonas de mayor tránsito de vehículos manteniendo la máxima distancia posible entre cada estación de dispensado. Para lo anterior, el Ministerio de Minas y Energía de acuerdo con la competencia establecida en el artículo 9 de la Ley 1964 de 2019, podrá reglamentar las condiciones necesarias para que en las estaciones de servicio se amplíe la oferta de servicios e incluya infraestructura de recarga de hidrógeno.

Las primeras hidrogeneras se ubicarán en localizaciones estratégicas que garanticen la demanda, tales como ciudades con alta población con importantes flotas de taxis o autobuses intermunicipales; o rutas comerciales terrestres, donde se impulsarán los llamados corredores de hidrógeno con un elevado tránsito de vehículos pesados de carga y pasajeros.

21. Planear un despliegue de infraestructura en coordinación con los sistemas eléctrico y gasista

- [Analizar la adecuación de la infraestructura eléctrica existente con respecto a la producción de hidrógeno verde](#)

Gran parte del potencial renovable de Colombia se encuentra ubicado en zonas en las que la red eléctrica se encuentra en fase de expansión, tales como La Guajira. Aunque en estas zonas se optará por favorecer la conexión directa entre plantas de producción de electricidad renovable y electrolizadores, se deberá también contar con una infraestructura eléctrica que permita aprovechar los vertidos excedentes de las plantas renovables, así como abastecer consumos en horas de baja producción renovable.

Por otro lado, si se opta por la instalación de electrolizadores en regiones de menor recurso renovable, pero con acceso a la red eléctrica, el impacto de los electrolizadores en el sistema eléctrico tendrá que ser analizado, ya que se abastecerán total o parcialmente con electricidad de la red.

- [Analizar el potencial reacondicionamiento de gaseoductos para el transporte de hidrógeno](#)

Colombia cuenta en la actualidad con una red de gaseoductos de más 7500 km de longitud destinada al transporte de gas natural. Esta red puede ser reacondicionada para el transporte de hidrógeno en aquellos tramos que conecten grandes centros productivos con importantes núcleos de demanda. De hecho, el reacondicionamiento de infraestructura de gas natural existente es la forma más competitiva de transportar grandes volúmenes de hidrógeno, hasta un 50% menos frente a la instalación de nuevos hidroductos.

Por tanto, es necesario identificar la ubicación de los tramos de red gasista que podrían ser utilizados para un transporte competitivo del hidrógeno, especialmente si se encuentran en desuso, y delinear un plan de adecuación de las infraestructuras.

- [Evaluar las ventajas obtenibles por la integración de sistemas \("sector coupling"\)](#)

El “sector coupling”, entendido como la integración del desarrollo de las infraestructuras de gas y electricidad, es considerado una de las herramientas claves para lograr una descarbonización gracias el menor costo de transporte del gas en comparación con la electricidad y a la posible planeación conjunta de infraestructura.

El hidrógeno permite aumentar el grado de acople entre los sectores gasista y eléctrico, sectores que, aunque llevan mucho tiempo conectados, lo están únicamente en una dirección: el consumo de gas para producción de electricidad. Sin embargo, la electrólisis permite el acople también en la otra dirección, al permitir que la energía eléctrica sea transformada en forma de hidrógeno gaseoso que puede almacenarse y transportarse aprovechando la infraestructura gasista.

No obstante, los beneficios obtenidos por el acople entre sistemas conllevan una mayor dificultad de planeación. Por este motivo, se impulsará la inclusión del rol del hidrógeno dentro de los planes indicativos de expansión del sistema eléctrico y del gasista elaborados por la UPME.

La UPME desempeña la planeación centralizada de infraestructura fomentando un desarrollo eficiente de infraestructura eléctrica y de gas, pero sin tener todavía en cuenta en cuenta el rol del hidrógeno como elemento de acople entre ambos sectores. Por tanto, se desarrollará política pública con el objetivo de incluir los estudios de acoplamiento de sectores dentro de un marco regulatorio y normativo que le asignase esta tarea a la UPME.

22. Desarrollar infraestructura de exportación de hidrógeno y derivados

- [Elaborar un plan de despliegue de infraestructura de exportación y puertos de acuerdo con la demanda internacional esperada y ambición de exportación](#)

Colombia puede convertirse en un actor relevante en términos de producción y exportación de hidrógeno debido a las buenas condiciones climáticas, a la gran superficie disponible para la instalación de plantas renovables y electrolizadores, y a su posicionamiento geoestratégico entre dos océanos.

Para poder aprovechar todo el potencial de país, se impulsarán estudios y planes de desarrollo de infraestructuras portuarias. Los análisis irán destinados a la habilitación y adaptación de los puertos del país para la exportación de hidrógeno. Entre los puertos más relevantes de Colombia en lo relativo a la exportación e importación de combustibles se encuentran Cartagena, Buenaventura, Coveñas y Tumaco. Además, el país cuenta con puertos ubicados en zonas de alto recurso renovable como Puerto Brisa en la región de La Guajira. En los puertos seleccionados se contemplará el desarrollo de infraestructura de acondicionamiento, transformación y almacenamiento de hidrógeno.

El transporte por barco de hidrógeno se hará en forma de hidrógeno líquido o mediante portadores tales como amoníaco, metanol y portadores orgánicos líquidos. Entre estos destaca el amoníaco por ser un compuesto utilizado de forma común en numerosos procesos, producirse a escala industrial con tecnologías maduras y disponer de normativa técnica y estándares consolidados. El puerto de Cartagena ya cuenta con infraestructura para la gestión de exportaciones e importaciones de amoníaco.

- [Impulsar el rol de Colombia como potencial hub logístico en el Caribe](#)

Colombia se encuentra muy próxima a vías de gran tránsito marítimo como el Canal de Panamá. En este contexto, se analizará la posibilidad de convertir el norte del país en un hub de distribución de hidrógeno en el Caribe. Además, el hidrógeno podría ser convertido a derivados como el amoníaco o metanol que pueden utilizarse como combustible marino para transporte nacional e internacional.

Para evaluar la viabilidad del plan, se impulsará la colaboración con aquellos países del Caribe que también se encuentren interesados en explorar y aprovechar esta oportunidad.

5.5. Impulso al desarrollo tecnológico

Fase 1. Sentar las bases del hidrógeno

23. Estructuración y creación del “sandbox” regulatorio

- **Habilitar “sandboxes” para proyectos de innovación fuera del marco jurídico vigente**

Los “sandboxes” regulatorios son instrumentos que permiten apoyar proyectos innovadores a través del levantamiento, temporal y limitado, a ciertas actividades de regulaciones que tengan un efecto limitante para su desarrollo.

Se fomentarán estos habilitadores, pues se considera que a nivel regulatorio también es necesario generar conocimiento en materia de hidrógeno. Por ello, para el desarrollo de proyectos de innovación que no estén permitidos por la regulación vigente, pero que se consideren de interés estratégico, se aplicará un marco regulatorio flexible que fomente el aprendizaje regulatorio y permita analizar el enfoque normativo más eficiente. El aprendizaje se basará en la experiencia internacional de otros países simplificando los pilotos a realizar y disminuir costos.

Un ejemplo claro de aplicación es el desarrollo de proyectos que permitan inyectar pequeños volúmenes de mezcla de hidrógeno en la red de gas natural. Dichos proyectos serían necesarios para entender como varía la calidad de gas, que problemas de operación pueden producirse, y que límites máximos son admisibles en la red gasista con carácter local.

En Colombia, la posibilidad de un “sandbox” regulatorio se ha introducido legalmente como un mecanismo para promover el emprendimiento en el país a través del artículo 5 de Ley 2069 de 2020, haciendo necesaria su regulación específica para su aplicación en materia de hidrógeno.

24. Desarrollar herramientas de gestión de conocimiento en ecosistema de hidrógeno de Colombia

- **Crear una base de datos con el registro de proyectos y empresas de hidrógeno**

Se creará un registro centralizado de proyectos y empresas propietarias de instalaciones de producción, acondicionamiento, transporte, distribución, almacenamiento o comercialización de hidrógeno y derivados, con el objetivo de identificar qué tipología y número de empresas están interesadas en participar en proyectos de hidrógeno, determinar los tipos de proyectos posibles, detectar sinergias y compartir mejores prácticas entre empresas.

De acuerdo con el artículo 7 parágrafo tercero de la Ley 2099 de 2021, el FENOGUE podrá crear, gestionar y administrar una plataforma de centralización de información y/o base de datos de proyectos de FNCE y de gestión eficiente de la energía.

25. Capacitar personal técnico y profesional a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno

- **Incluir el hidrógeno en los planes de formación existentes**

En colaboración con las instituciones educativas nacionales, se impulsará la inclusión de las tecnologías del hidrógeno dentro de los planes educativos y titulaciones existentes, tanto de formación profesional como técnica, que tengan relación temática con el hidrógeno. Para ello, se impulsará el desarrollo de planes de transferencia tecnológica y de conocimiento con universidades y empresas así como programas de financiación para la formación de profesionales.

- **Formar y certificar personal local en materia de hidrógeno y sus tecnologías habilitantes**

El hidrógeno es un gas cuyas propiedades lo hacen difícil de manipular y almacenar debido a su baja densidad y alta inflamabilidad. Por este motivo, la penetración del hidrógeno en nuevas aplicaciones demandará perfiles con competencias técnicas adecuadas. Del mismo modo, será necesario disponer de competencias en tecnologías habilitantes del hidrógeno de bajas emisiones como es la captura, utilización y secuestro del CO₂.

Para que el despliegue del hidrógeno y estas tecnologías se realicen en condiciones de seguridad y sin generar rechazo por parte la población, es fundamental dotar de formación y crear certificaciones que acrediten a los profesionales técnicos. En este contexto, se elaborarán planes de formación, específicos para cada sector, para adaptar profesionales tales como mecánicos de talleres, personal de emergencia o asistentes de carretera al manejo seguro del hidrógeno.

El Ministerio de Trabajo junto al Ministerio de Educación, de Minas y Energía y el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) trabajarán por el desarrollo de programas de formación del personal que se requieren para configurar la industria de hidrógeno.

Con el objetivo de maximizar el potencial del hidrógeno en Colombia, se elaborará y ejecutará un plan de formación a los funcionarios públicos de los Ministerios cuyos ámbitos de actuación estén relacionados con el hidrógeno. Esto permitirá la mejor toma de decisiones en materia de este nuevo vector energético, fomentará la aparición de proyectos y oportunidades de descarbonización mediante hidrógeno, y servirá como punto de referencia para extender posteriormente la formación a otros ámbitos.

26. Impulsar las capacidades industriales locales en tecnologías de hidrógeno

- **Evaluar las fortalezas de la industria local en la cadena de valor del hidrógeno**

La nueva industria del hidrógeno precisa del desarrollo de tecnología a lo largo de toda la cadena de valor. Además, se precisa de múltiples empresas tales como fabricantes, ensambladores, ingenierías, reciclaje de componentes y equipos.

Se promoverá la realización de un estudio de impacto-socioeconómico de las tecnologías del hidrógeno en Colombia. Además, con fines de aprovechar la oportunidad de crecimiento socioeconómico y de recuperación tras la crisis del Covid-19, se impulsará la creación de grupos de trabajo con las instituciones públicas (destacando el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación), asociaciones empresariales y representantes del sector privado, con el fin de potenciar la participación de las empresas locales en el desarrollo, fabricación, montaje, instalación o reciclaje de equipos. Esta colaboración permitirá crear las condiciones propicias para la generación de riqueza y la creación de puestos de trabajo cualificados en Colombia, e incluso la valoración de una posible exportación de equipos/tecnología.

- **Apoyo a la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) nacional mediante financiación e impulso a los grupos de trabajo existentes**

El desarrollo del hidrógeno todavía precisa un gran avance tecnológico y, por ello, se considera que más allá del apoyo al despliegue de la producción y de la demanda, Colombia podría incentivar también la innovación tecnológica, sobre todo cuando esto permita la creación y el fortalecimiento de empresas e iniciativas locales. Por este motivo, se impulsarán programas de investigación e innovación orientados a la mejora de las capacidades tecnológicas e industriales del país.

El Gobierno deberá desempeñar un papel central estableciendo ayudas a la i+D+i, impulsando programas de investigación y fomentando la captación de capital privado mediante

colaboraciones público-privadas. En Colombia existen diferentes fondos creados por ley que estarían llamados a financiar proyectos de hidrógeno de bajas emisiones: el Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación (FCT), que tiene por objeto incrementar la capacidad científica, tecnológica, de innovación y de competitividad regional; el Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, que permite a Min Ciencias desarrollar mecanismos flexibles para financiar actividades de ciencia, tecnología e innovación integrando recursos públicos, privados, internacionales y donaciones.

Por otro lado, se fomentarán aquellos grupos de trabajo existentes en Colombia entorno al hidrógeno en las distintas universidades del país y a las asociaciones empresariales, encargados en su conjunto de facilitar la transferencia tecnológica desde la investigación al mercado nacional e internacional. Posteriormente, una vez que ya se han potenciado las iniciativas desarrolladas hasta la fecha, se analizará la idoneidad de crear un Centro Nacional de Hidrógeno que sirva como área de demostración de proyectos piloto y desarrollo de aplicaciones futuras, permitiendo a Colombia no solo posicionarse en la producción de este nuevo vector energético, sino también contribuir a la mejora de su tecnología. De acuerdo con los nuevos desarrollos realizados, se evaluará que tecnologías podrían industrializarse y exportarse desde Colombia.

Fase 2. Habilitar y fomentar el desarrollo del mercado

27. Mitigar el riesgo tecnológico mediante proyectos piloto

- **Impulsar el desarrollo temprano de pilotos a lo largo de toda la cadena de valor**

Con el objetivo de mitigar el riesgo tecnológico y de negocio, se impulsará el desarrollo de proyectos piloto que determinen la viabilidad, tanto técnica como económica del hidrógeno de bajas emisiones, desde su producción hasta los usos finales. El impulso se llevará a cabo mediante incentivos económicos y facilidades administrativas que reduzcan el diferencial de costo debido a la aplicación de tecnologías bajas en emisiones frente a soluciones convencionales.

Se promoverán pilotos en múltiples ámbitos destacando: las tecnologías de electrólisis, la captura y almacenamiento de CO₂, la infraestructura de distribución de hidrógeno a nivel nacional y el transporte de hidrógeno y derivados a otros países.

En vías de promover la inversión privada y adoptar mejores prácticas, se impulsará la creación de un equipo operativo para acompañar la tramitación de permisos y el desarrollo de los primeros pilotos. Esto reducirá la incertidumbre, generará aprendizajes, resolverá fallas de coordinación y posibilitará una introducción segura de las nuevas tecnologías. Además, estos pilotos podrán convertirse en los primeros núcleos de demanda y producción, incentivando el desarrollo de mercado que, posteriormente, beneficiará al resto de actores.

Fase 3. Monitoreo del desarrollo y permitir nuevos casos de uso

28. Monitoreo de la producción y consumo de hidrógeno por tipología y sector

- **Desarrollar un sistema de monitoreo de la producción y consumo de hidrógeno**

Con fines a garantizar el correcto desarrollo del mercado del hidrógeno de bajas emisiones, se impulsará el desarrollo de una plataforma nacional que registre la producción, consumo y precios de hidrógeno a escala industrial en Colombia, diferenciando por tipos de hidrógeno, como el gris, azul o verde, y por sectores de consumo.

Este sistema, que estará integrado con el registro de proyectos y empresas de hidrógeno nacional (primera medida de la línea de trabajo 24), facilitará la toma de decisiones en materia de despliegue de infraestructura, permitirá evaluar el grado de cumplimiento de las medidas y objetivos

establecidos, y estará alineada con el sistema nacional de garantías de origen o certificación de hidrógeno de bajas emisiones.

El sistema de monitoreo también hará seguimiento de otros parámetros sociales y económicos como la generación de empleo o el nivel de inversiones para determinar los impactos de las tecnologías del hidrógeno en la economía de Colombia.

Anexo I. Plan de socialización

En paralelo a la elaboración de esta hoja de ruta, se ha ejecutado el plan de socialización, en el que se han compartido los resultados preliminares de los análisis realizados y se han intercambiado experiencias y mejores prácticas con entidades relevantes para el desarrollo del hidrógeno en Colombia. En dicho plan de socialización, se han recogido las contribuciones de diversas entidades, entre las que se incluyen:

- Entidades públicas
- Asociaciones y grupos empresariales
- Generadores eléctricos
- Transportistas y distribuidores de gas natural
- Productores y consumidores de hidrógeno
- Carboneras
- Empresas de servicios de movilidad
- Ingenierías
- Fabricantes de equipos
- Universidades y centros de investigación
- Organismos multilaterales

El objetivo del plan de socialización ha sido alinear la ambición y objetivos del Ministerio con las de los distintos actores que desarrollarán proyectos de hidrógeno para contribuir a la descarbonización de la economía colombiana.



Figura 19: Plan de socialización de la Hoja de Ruta del Hidrógeno

Inicialmente se ha lanzado una consulta preliminar, consistente en una encuesta con preguntas relacionadas con las actividades de análisis previas a la elaboración de la hoja de ruta. En esta consulta, han participado 46 entidades nacionales e internacionales aportando su visión particular de las oportunidades y barreras para el desarrollo de la economía de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia.

En paralelo al desarrollo de las actividades de análisis previas a la elaboración de la hoja de ruta, se han realizado 27 entrevistas en profundidad con diversos actores del ecosistema económico y social colombiano (empresas privadas, asociaciones, universidades y organismos multilaterales). En estas entrevistas se han intercambiado experiencias y mejores prácticas a implementar en Colombia, complementando así los análisis del Ministerio.

Los principales resultados y conclusiones de la fase de análisis, previa a la elaboración de la Hoja de Ruta, se han validado en 12 talleres de trabajo en los que han participado diversos ministerios (Ministerio de Energía y Minas, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación y Ministerio de Transporte) y otras entidades no vinculadas directamente al sector público. En estos talleres, los asistentes han podido comentar y valorar los resultados y conclusiones mostrados en esta Hoja de Ruta.

Por último, se ha sometido a consulta pública el borrador de la presente Hoja de Ruta. Los comentarios y recomendaciones han contribuido a delinear la versión definitiva aportando las perspectivas de los distintos sectores.

Anexo II. Gobernanza

Con el objetivo de asegurar el correcto despliegue, seguimiento y evaluación de esta Hoja de Ruta, se considera necesario crear una estructura de gobernanza que monitoree el desarrollo del hidrógeno de bajas emisiones en Colombia.

Modelo de gobierno

La monitoreo de la Hoja de Ruta será liderada por un Comité de Seguimiento, que se encargará de velar por la correcta implantación y desarrollo de las medidas expuestas en los ejes de actuación. El Comité estará integrado por miembros del Ministerio y representantes de otros organismos, tanto públicos como privados, tal y como muestra la Figura 20.

El Comité tendrá la responsabilidad de coordinar con las distintas partes interesadas, tanto públicas como privadas, la ejecución de las medidas expuestas en los ejes de actuación. Para ello, se evaluará la organización de una PMO para ayudar en la gestión de las actividades del comité, así como velar por el cumplimiento y ejecución de las medidas indicadas en los ejes de actuación.



Figura 20: Modelo de Gobierno de la Hoja de Ruta del Hidrógeno

Funciones del Comité de Seguimiento

Las funciones a desarrollar por este órgano público-privado son las siguientes:

- Aportar una visión global de la Hoja de Ruta, en cuanto a implementación, monitorización y evaluación de la misma.
- Elaborar recomendaciones generales para explotar las oportunidades del hidrógeno.
- Coordinar a las partes interesadas y desarrollar mesas técnicas en materia de hidrógeno.
- Apoyar activamente a los distintos ministerios en la aplicación de las medidas.
- Impulsar la formación de consorcios y acuerdos, nacionales e internacionales, con el objetivo de atraer inversiones y facilitar la financiación de proyectos.
- Identificar nuevas áreas e iniciativas estratégicas, así como implicarse en su desarrollo.

Para el desarrollo de las funciones indicadas, el Comité de Seguimiento se reunirá con una periodicidad anual, sin perjuicio de que puedan convocarse reuniones extraordinarias cuando se considere oportuno. Los miembros del Comité podrán requerir la participación puntual de expertos del sector a debatir y tomar decisiones sobre alguna temática específica.

Indicadores de seguimiento

El monitoreo y la evaluación del progreso se realizará en base a una serie de indicadores. Estos indicadores serán analizados con una periodicidad mínima de 3 años y permitirán obtener una evaluación global de la estrategia, determinar el grado de implementación de las medidas y evaluar el cumplimiento de los objetivos.

Esta revisión será la herramienta principal para llevar a cabo las adaptaciones necesarias a la Hoja de Ruta, velando por que está se mantenga en línea con los desarrollos tecnológicos y las tendencias del mercado.

Los indicadores se han enmarcado en 2 áreas, producción y demanda, y son los siguientes.

Indicadores de **producción** de hidrógeno de bajas emisiones:

- **Número de proyectos desarrollados.** Apoyándose en el registro de proyectos de hidrógeno que se llevará a cabo (primera medida de la línea de trabajo 24), se contabilizará el número de proyectos, las empresas involucradas, la capacidad de producción de hidrógeno, la tecnología utilizada y la ubicación escogida.
- **Capacidad de electrólisis (GW instalados).** De la lista anterior, se extraerán aquellos proyectos de electrólisis, y se registra la capacidad instalada acumulada en Colombia.
- **Volumen de producción (toneladas de hidrógeno).** Se registrará el volumen total de producción de hidrógeno en Colombia, distinguiendo por tipología de hidrógeno (gris, azul o verde) y tecnología utilizada.

Indicadores de **demand**a de hidrógeno de bajas emisiones:

- **Volumen de consumo (toneladas de hidrógeno).** Con vistas a desarrollar una plataforma nacional de monitoreo de producción y consumo de hidrógeno (primera medida de la línea de trabajo 28), se pedirá a los productos de hidrógeno que indiquen los contratos con las empresas consumidoras (nacionales o internacionales) o, en su defecto, si es hidrógeno para consumo propio. Este registro permitirá evaluar la penetración del hidrógeno de bajas emisiones en los distintos sectores y subsectores, así como la contribución del mismo a la descarbonización.
- **Número de vehículos.** En colaboración con el Ministerio de Transporte, y tomado como base el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), se contabilizará el número de vehículos de hidrógeno, su tipología (distinguiendo entre livianos de pasajeros, livianos de carga, pesados de pasajeros y pesados de carga), y la penetración que suponen estos vehículos dentro del parque automotriz nacional.
- **Número de estaciones de dispensado de hidrógeno.** En línea con el anterior indicador, se registrará el número de hidrogeneras de acceso público disponibles en el país a fin de garantizar un despliegue coordinado de flota e infraestructura de repostaje.