



AEMES Smart

Asociación de Empresas de Movilidad,
Entorno Sostenible y Smart

SmartVision Paper#6: Captura, Uso y Almacenamiento de CO₂

Con la colaboración de:

eurecat
Centre Tecnològic de Catalunya



Noviembre de 2025

AEMES SMART

Av. Fabregada 93, 1º 3a, Esc. D.

08901 L'Hospitalet- Barcelona

Telf.: 93 337 04 50

E-mail: info@aemes-smart.com

www.aemes-smart.com

ÍNDICE

Resumen ejecutivo	3
Glosario.....	6
Introducción: marco normativo de la descarbonización y de las tecnologías CCUS.....	8
Captura, Transporte, Almacenamiento y Uso de Carbono	12
Contexto internacional y local: análisis del marco global y cómo se posiciona el territorio en este ámbito	24
Casos de éxito: ejemplos de proyectos o industrias que implementan CCUS.....	27
Repercusiones económicas: análisis del impacto económico, incluyendo la creación de oportunidades laborales y el desarrollo de nuevos mercados	32
Análisis de industrias relacionadas: evaluación de cómo las CCUS pueden beneficiar o transformar industrias emisoras clave	36
Retos y Oportunidades: identificación de barreras normativas, técnicas, estratégicas y políticas, y explorar las oportunidades asociadas	38
Conclusiones y recomendaciones	42

Resumen ejecutivo

La transición hacia una economía climáticamente neutra obliga a desplegar, de manera combinada, todas las **palancas de descarbonización** disponibles: **eficiencia energética, electrificación, energías renovables, hidrógeno renovable, bioeconomía** y, muy especialmente, las **tecnologías de captura, uso y almacenamiento de CO₂ (CCUS)** en los sectores de difícil abatimiento.

Este *Smart Vision Paper* analiza el marco normativo, tecnológico, económico e industrial del CCUS y plantea una visión estratégica para Cataluña y España en el contexto europeo e internacional. El documento revisa la cadena de valor completa —captura, transporte, almacenamiento y uso del CO₂—, el posicionamiento internacional y local, las repercusiones económicas, los casos de éxito y las industrias prioritarias, así como los principales retos y oportunidades asociados al desarrollo de estas tecnologías.

Mensajes clave:

Tecnologías de captura, uso y almacenamiento de CCUS, un complemento imprescindible. En el sector energético, donde los combustibles fósiles se utilizan principalmente por su contenido energético, las primeras opciones de descarbonización siguen siendo la eficiencia energética, la electrificación y las energías renovables. Pero en el sector químico y en muchas industrias de proceso, el reto es diferente: estas actividades no dependen sólo de la energía de los combustibles fósiles, sino también de su contenido en carbono, que es indispensable para fabricar materiales y productos químicos. En estos casos, las emisiones son intrínsecas al proceso y no se pueden eliminar sólo electrificando. Por ello, las tecnologías de captura, uso y valorización del CO₂ se convierten en esenciales para sustituir el carbono fósil por carbono renovable o reciclado y avanzar hacia una industria completamente desfosilizada.

La cadena CCUS es tecnológicamente viable pero intensiva en energía y capital. El documento describe los principales métodos de captura (precombustión, postcombustión, oxidación y captura directa del aire), las tecnologías de separación (absorción, adsorción, membranas, criogenia, carbonatación/mineralización), las opciones de transporte (tuberías, barcos, camiones cisterna) y las rutas de almacenamiento geológico y de uso del CO₂, tanto directos como mediante su conversión en productos químicos y combustibles sintéticos.

El contexto internacional muestra una aceleración clara del CCUS. En Estados Unidos, la combinación de incentivos fiscales y programas federales está impulsando grandes proyectos de captura. Por otra parte, en Asia, países como China y Corea del Sur también

han incorporado la captura y el almacenamiento de carbono (CCS) en sus políticas energéticas nacionales, reconociendo su importancia para el logro de la neutralidad de carbono. En Europa, la Ley sobre la industria de cero emisiones netas fija para 2030 una capacidad mínima de inyección de CO₂ y obliga a los estados miembros a planificar y declarar sus capacidades de almacenamiento. Noruega, Países Bajos, Dinamarca, Reino Unido e Italia ya están desplegando *hubs* de transporte y almacenamiento en el mar del Norte y en el Adriático.

Las necesidades de captura para alcanzar la neutralidad climática son muy significativas. Según la Agencia Internacional de la Energía, el mundo deberá capturar y almacenar varias gigatoneladas anuales de CO₂ a mediados de siglo. Para la Unión Europea se habla de entre 300 y 600 millones de toneladas anuales, y para España, de unos 35-40 millones de toneladas, principalmente en sectores como el cemento, la química de base, la refinación y la siderurgia.

El CCUS abre una nueva cadena de valor industrial y de conocimiento. Las inversiones previstas en captura, transporte, almacenamiento y uso del CO₂ generan oportunidades en las etapas de ingeniería, construcción, operación, mantenimiento de los diferentes proyectos que se pongan en marcha, con la incorporación de nuevos materiales (sorbentes, catalizadores, ...) y en la producción de combustibles o productos químicos sintéticos, por ejemplo. El desarrollo de estos mercados contribuirá a la reindustrialización verde, a la creación de empleo cualificado y al posicionamiento internacional de las empresas punteras.

Cataluña dispone de activos diferenciales para liderar el CCUS en el sur de Europa. El clúster químico y energético de Tarragona, el ecosistema del hidrógeno, la presencia de infraestructuras logísticas y portuarias de primer nivel, la capacidad de investigación e innovación, así como la definición del Centro de Descarbonización de la industria catalana y el proyecto TarraCO₂ como almacén *offshore*, sitúan el territorio en una posición privilegiada para convertirse en un *hub* de gestión del carbono y de combustibles sintéticos.

El Centro de Descarbonización y las cuatro plantas piloto móviles son piezas clave de la transición. Las unidades de ensayo de captura por absorción líquida, adsorción sólida y carbonatación, junto con la planta de conversión Reverse Water Gas Shift & Fischer-Tropsch, permitirán ensayar tecnologías CCUS en condiciones reales de industria, reducir el riesgo de los proyectos a gran escala y acelerar su maduración tecnológica y económica.

Recomendaciones estratégicas:

Definir una estrategia integrada de CCUS para Cataluña y España, alineada con el marco europeo, que identifique sectores prioritarios, recorridos tecnológicos, necesidades de infraestructura y objetivos cuantitativos de captura y almacenamiento en 2030, 2040 y 2050.

Aprovechar las oportunidades que los necesarios despliegues tecnológicos suponen para nuestra industria y ecosistema empresarial, tanto por las industrias usuarias de la tecnología, como por las que pueden desarrollarla.

Planificar y desplegar una red coordinada de transporte y almacenamiento de CO₂, combinando ceoductos, terminales portuarias y almacenes geológicos *offshore* y *onshore*, con especial atención al corredor mediterráneo y al papel del proyecto TarraCO₂.

Impulsar un marco regulador y de financiación estable y previsible, que complemente la señal de precio del CO₂ (EU ETS) con instrumentos de apoyo a la inversión y la operación (ayudas CAPEX, contratos por diferencia, mecanismos de riesgo compartido), y simplifique y acelere los procedimientos de autorización y evaluación ambiental.

Reforzar el rol de los centros tecnológicos, centros de investigación, universidades e infraestructuras de ensayo, como el del futuro Centro de Descarbonización, espacio de prueba, demostración y transferencia al tejido industrial, y como plataforma de formación de talento especializado en CCUS e hidrógeno.

Trabajar la aceptación social y la transparencia, explicando de forma rigurosa los beneficios y riesgos del CCUS, y asegurando una gobernanza participativa de los proyectos, especialmente en relación con el almacenamiento geológico y las nuevas infraestructuras.

Glosario

Acuerdo de París de 2015: tratado internacional jurídicamente vinculante adoptado en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que establece el compromiso global de limitar el aumento de la temperatura media mundial promoviendo estrategias nacionales de reducción de emisiones.

Agenda 2030: hoja de ruta global de las Naciones Unidas para promover un desarrollo económico, social y ambientalmente sostenible, que incluye los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

AVR (Accreditation and Verification Regulation): Reglamento europeo que establece los requisitos de acreditación de los verificadores independientes y la periodicidad de las auditorías en el marco del seguimiento de las emisiones de CO₂.

Cap and trade: Mecanismo de mercado que establece un límite máximo de emisiones y permite la compra y venta de derechos de emisión.

CCS (Carbon Capture and Storage): tecnologías de captura y almacenamiento geológico permanente del CO₂.

CCU (Carbon Capture and Utilisation): tecnologías de captura y utilización del CO₂ como recurso en procesos industriales.

CCUS (Carbon Capture, Utilisation and Storage): conjunto integrado de tecnologías para capturar, utilizar y almacenar el CO₂.

Comunicación de la Comisión sobre los Ciclos de Carbono Sostenibles (COM(2021) 800): comunicación de la Comisión Europea que promueve la creación de un marco coherente para el almacenamiento y la reutilización del carbono, integrando el uso del CO₂ capturado en materiales, productos y suelos agrícolas.

COP30: 30ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Belém (Brasil), del 10 al 21 de noviembre de 2025.

DAC (Direct Air Capture): captura directa de CO₂ del aire ambiente.

EOR (Enhanced Oil Recovery): técnica de recuperación avanzada de petróleo mediante la inyección de CO₂ en los yacimientos.

EU ETS (European Union Emisiones Trading System): régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea, basado en el principio de cap and trade.

FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional): instrumento financiero de la Unión Europea destinado a reducir las desigualdades entre las diferentes regiones de Europa y favorecer el desarrollo económico, social y territorial equilibrado.

Fit for 55: paquete legislativo europeo para alcanzar el objetivo que regula la Ley Europea del Clima de neutralidad en emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2050.

GEI (Gases con Efecto Invernadero): gases que contribuyen al calentamiento global, como el CO₂, el metano, etc.

IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle): tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado para la generación de electricidad con captura de CO₂.

Ley Europea del Clima: reglamento europeo que confiere carácter vinculante al objetivo de neutralidad en emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2050.

Ley de Cambio Climático: ley española que regula la transición energética y la reducción de emisiones.

Ley sobre la Industria de Cero Emisiones Netas (Net Zero Industry Act): Ley europea que fija objetivos de almacenamiento de CO₂ y obliga a los estados miembros a informar sobre sus capacidades.

MRR (Monitoring and Reporting Regulation): reglamento europeo que establece los criterios técnicos para cuantificar el CO₂ capturado, transportado y almacenado.

ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible): son los 17 objetivos globales adoptados por las Naciones Unidas en 2015 dentro de la Agenda 2030, que establecen una hoja de ruta para alcanzar un desarrollo económico, social y ambientalmente sostenible en todo el mundo.

Pacto Verde Europeo (European Green Deal): hoja de ruta estratégica adoptada por la Unión Europea en 2019 para transformar la economía europea hacia la neutralidad climática. Incluye medidas para reducir emisiones, fomentar la eficiencia energética, impulsar la economía circular, proteger la biodiversidad y garantizar una transición justa, convirtiendo la lucha contra el cambio climático en una prioridad transversal de todas las políticas europeas.

PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima): plan español que establece objetivos de reducción de emisiones, energías renovables y eficiencia energética.

Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (EU ETS): mecanismo de mercado creado por la Unión Europea para limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de manera rentable y económicamente eficiente.

STEP (Strategic Technologies for Europe Platform): iniciativa europea para movilizar fondos públicos e impulsar proyectos industriales en tecnologías estratégicas —digitales, limpio-cero y biotecnológicas— con el objetivo de fortalecer la competitividad de la UE y reducir su dependencia estratégica.

Introducción: marco normativo de la descarbonización y de las tecnologías CCUS

La transición hacia una economía climáticamente neutra constituye uno de los principales retos regulatorios y tecnológicos de nuestro tiempo. En este contexto, el desarrollo del **hidrógeno verde** y las tecnologías de **captura, utilización y almacenamiento de carbono** —clasificadas habitualmente en **CCS** (captura y almacenamiento geológico permanente), **CCU** (captura y utilización del CO₂ en procesos industriales) y **CCUS**, que integra ambas opciones— se convierten en instrumentos esenciales para alcanzar los objetivos internacionales y europeos de descarbonización. Esta distinción es relevante para situar el alcance de este informe, centrado principalmente en el CCUS, en sintonía con la orientación estratégica de la Unión Europea hacia una gestión integrada del carbono. Cabe destacar que su impulso y despliegue no dependen únicamente de la madurez tecnológica, sino también de un **entramado normativo** que articula compromisos, obligaciones, incentivos y mecanismos de apoyo.

El punto de partida de este marco jurídico es el **Acuerdo de París de 2015**, tratado internacional jurídicamente vinculante adoptado en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Este acuerdo establece el compromiso global de **limitar el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2 °C y de continuar los esfuerzos para no superar los 1,5 °C**, promoviendo estrategias nacionales de reducción de emisiones. Este compromiso ha servido de **base para la acción climática de la Unión Europea**, que ha asumido un papel de liderazgo normativo y político en este ámbito.

En el ámbito comunitario, el **Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*)**, adoptado por la Comisión Europea en el año 2019, constituye la hoja de ruta para transformar el modelo económico de la Unión Europea hacia la neutralidad climática y la eficiencia en el uso de los recursos. Este marco estratégico se concreta en diversos instrumentos jurídicos, entre los que destaca el **Reglamento (UE) 2021/1119**, conocido como **Ley Europea del Clima**, que confiere carácter vinculante al objetivo de neutralidad en emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2050 y fija un hito intermedio de reducción de al menos el 55% para el año 2030 respecto a los niveles de 1990. Para materializar este objetivo, la Comisión impulsó el **paquete legislativo "Fit for 55"**, conformado por un conjunto de directivas y reglamentos que reforman la política energética, de transporte y de comercio de derechos de emisión.

En relación con los derechos de emisión, uno de los instrumentos derivados más relevantes que encontramos es el **Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la**

Unión Europea (EU ETS), regulado por la Directiva 2003/87/CE, actualizado recientemente por la Directiva (UE) 2023/958 y la Directiva (EU) 2023/959 y regulado en España por la Ley 1/2005, de 9 de marzo. Se trata de un mecanismo de mercado basado en el principio de *cap and trade* (es decir, "limitar y comerciar") que se considera la piedra angular de la política climática de la Unión Europea, ya que permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de una manera rentable y económicamente eficiente. Este establece un límite máximo de emisiones y permite la compra y venta de derechos de emisión, generando así un incentivo económico para reducir el carbono.

Además, la reciente **Ley sobre la Industria de Cero Emisiones Netas (Net Zero Industry Act)**¹, aprobada en 2024, refuerza el compromiso industrial con la neutralidad climática, fijando la obligación de los estados miembros de informar sobre sus capacidades anuales de almacenamiento de CO₂ antes del 31 de diciembre de 2026 y estableciendo el objetivo común de capturar y almacenar 50 millones de toneladas anuales de CO₂ en el año 2030. De manera complementaria, la **Comunicación de la Comisión sobre los Ciclos de Carbono Sostenibles (COM(2021) 800)** promueve la creación de un marco coherente para el almacenamiento y la reutilización del carbono, integrando el uso del CO₂ capturado en materiales, productos y suelos agrícolas.

El desarrollo de estas políticas se apoya en diversos organismos de la Unión Europea, como el Fondo de Innovación, destinado a impulsar tecnologías limpias a gran escala; el Fondo de Transición Justa, que apoya a las regiones más afectadas por la descarbonización; y los programas de cohesión y desarrollo regional (FEDER 2021–2027), actualmente alineados con la iniciativa STEP (Strategic Technologies for Europe Platform) para priorizar proyectos de descarbonización industrial y tecnologías de cero emisiones netas.

En este contexto internacional, cabe destacar la reciente Declaración de Belém sobre industrialización verde global, adoptada el 16 de noviembre de 2025 en la COP30, que impulsa la descarbonización de la industria pesada a nivel mundial mediante la cooperación internacional, la transferencia tecnológica y el apoyo financiero a los países emergentes. Esta declaración, suscrita por más de treinta países, refuerza el compromiso de avanzar hacia una industria más limpia, circular y competitiva, alineada con los objetivos del Acuerdo de París. Cabe destacar que España se ha adherido a la Declaración de Belém, comprometiéndose a descarbonizar sectores como el acero, el cemento y la química, impulsar la innovación tecnológica y la cooperación internacional, y liderar proyectos industriales verdes con un enfoque en la justicia climática.

En España, el **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021–2030 (PNIEC)**, actualizado en 2023, constituye el **eje de la política energética y climática**. Establece el objetivo de reducir al menos un 23% de las emisiones de gases de efecto invernadero

¹ Reglamento (UE) 2024/1735 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024.

para 2030 respecto a 1990, aumentar las energías renovables y mejorar la eficiencia energética.

Este plan se articula con la **Ley 7/2021, de cambio climático y transición energética ("Ley de Cambio Climático")**, y con el desarrollo normativo reciente que incluye el **Real Decreto 91/2025**, sobre el mecanismo de gobernanza energética y climática, y el **Real Decreto 214/2025**, que actualiza el registro de huella de carbono y obliga a grandes empresas y entidades públicas a elaborar planes de reducción quinquenales.

En materia de **captura y almacenamiento de carbono**, España ha incorporado la **Directiva 2009/31/CE²** mediante la **Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono**, que regula la autorización, control y clausura de los almacenamientos geológicos de CO₂, así como las garantías de seguridad ambiental y responsabilidad posterior. De acuerdo con la Ley 40/2010, el carbono capturado y almacenado de manera permanente en un lugar autorizado no se considera "emitido" a efectos de la EU ETS, siempre que se cumplan los requisitos de monitorización y verificación establecidos por la normativa europea.

En el ámbito catalán, han surgido diversas iniciativas orientadas a cooperar en la consecución de los objetivos comunitarios y estatales en materia de descarbonización, entre las que se encuentra la **Estrategia del Hidrógeno de Cataluña 2020-2030**, impulsada por el Departamento de Acción Climática, Alimentación y Agenda Rural y el Instituto Catalán de Energía (ICAEN). Constituye el instrumento de planificación principal para fomentar la producción y el uso de hidrógeno renovable. Esta estrategia se complementa con el Valle del Hidrógeno de Cataluña, una iniciativa de colaboración pública y privada que integra empresas, centros de investigación, universidades, centros tecnológicos y administraciones con el objetivo de crear un ecosistema industrial efectivo del hidrógeno verde, en línea con las directivas europeas sobre descarbonización.

En este mismo contexto, destaca el **Proyecto de Descarbonización de la Industria Electrointensiva de Cataluña**, que impulsa la Alianza para la Descarbonización de la Industria de Tarragona y presentado al Instituto Catalán de Investigación Química (ICIQ) el 12 de febrero de 2025. El objetivo principal es el desarrollo de soluciones innovadoras para la captura y uso del CO₂ en sectores clave, mediante la creación de cuatro plantas piloto experimentales móviles, de escala preindustrial, para ser ensayadas en la

² Directiva 2009/31/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono y por la que se modifican la Directiva 85/337/CEE del Consejo, las Directivas 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE, 2008/1/CE y el Reglamento (CE) núm. 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo.

industria. Este proyecto cuenta con una financiación inicial de 5 millones de euros y está incluida en el Programa FEDER Cataluña 2021-2027.

Asimismo, según un **informe elaborado por el Departamento de Acción Climática, Alimentación y Agenda Rural**³, actualmente el ecosistema del hidrógeno en Cataluña ya genera 426 millones de euros con la presencia de 140 empresas a lo largo de su cadena de valor que generan más de 1.300 puestos de trabajo.

Además, hay que tener presente que el marco normativo de la descarbonización se inscribe también dentro de la **Agenda 2030 de las Naciones Unidas** y sus **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**, adoptados en el año 2015 como hoja de ruta global para promover un desarrollo económico, social y ambientalmente sostenible. En este contexto, el **ODS 13: Acción por el Clima**, de acuerdo con el Acuerdo de París, el Pacto Verde Europeo y la Ley Europea del Clima, actúa como marco transversal que establece el compromiso de los estados miembros de "tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos", integrando la mitigación y la adaptación climática en las políticas públicas y en las estrategias de desarrollo.

A nivel estatal y autonómico, las estrategias de descarbonización y el despliegue de tecnologías CCUS contribuyen directamente a la consecución del ODS 13, a la vez que favorecen otros objetivos complementarios, como el **ODS 7 (Energía asequible y no contaminante)**, el **ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura)** y el **ODS 12 (Producción y consumo responsables)**. De este modo, la integración de los ODS en el marco regulador español y europeo no sólo refuerza la coherencia de las políticas climáticas, sino que también consolida un enfoque sistémico donde la lucha contra el cambio climático se vincula con la competitividad económica, la innovación y la justicia social.

En conjunto, todo este entramado de instrumentos jurídicos y económicos actúa como un **motor de transformación económica y ambiental** y conforma un **ecosistema regulador orientado a garantizar que la captura, el almacenamiento y la utilización del CO₂ se desplieguen de forma segura y eficiente**, fomentando el desarrollo de herramientas efectivas para alcanzar la neutralidad climática, promoviendo al mismo tiempo la competitividad industrial, la innovación tecnológica y la sostenibilidad ambiental. En este contexto, **Cataluña se posiciona como un territorio puntero** en la aplicación práctica de estos objetivos europeos, con un claro **compromiso para integrar la investigación, la tecnología y la industria** con el objetivo de **avanzar hacia un modelo productivo más limpio, circular y competitivo**.

³ Informe elaborado por el Departamento de Acción Climática, Alimentación y Agenda Rural, titulado «*El ecosistema del hidrógeno en Cataluña ya genera una facturación de 426 millones de euros, según un estudio de ACCIÓ*», publicado el 18 de julio de 2022 en el sitio web de ACCIÓ: <https://www.accio.gencat.cat/ca/accio/premsa-comunicacio/cercador-premsa-actualitat/article/20220718-hidrogen-verd-catalunya>.

Captura, Transporte, Almacenamiento y Uso de Carbono

El **CO₂ o dióxido de carbono** es uno de los principales **gases de efecto invernadero (GEI)** generado por las actividades humanas e industriales. El incremento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera está acelerando la **crisis climática** debido al calentamiento global que provoca.

La **captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS)** son un conjunto de tecnologías clave en la lucha contra el cambio climático, que serán imprescindibles para poder alcanzar los **objetivos del Pacto Verde de la UE (Green Deal)**, establecidos en diciembre 2019 de conformidad con el Acuerdo Internacional de París. Y más, cuando en diciembre de 2020, los líderes europeos acordaron incrementar el **objetivo de reducción de emisiones** netas de gases de efecto invernadero del 40% al **55% para 2030**, en comparación con los niveles de 1990, aprobando el paquete de medidas "Fit for 55", con el fin de hacer realidad los objetivos de la Ley Europea del Clima, que establece y define el objetivo de **neutralidad climática de Europa para 2050**, y que precisamente integra las tecnologías CCUS como herramientas para alcanzarla.

Según los últimos datos de la IEA (**Agencia Internacional de la Energía**), las **emisiones globales de CO₂** han continuado incrementándose, pero de manera más lenta que la actividad económica global y **en el 2024 subieron un 0,8% respecto al crecimiento del 3,2% del PIB global**, lo que significa que se mantiene desde 2021 un cierto desacoplamiento entre el crecimiento de la economía y el crecimiento de las emisiones. Este incremento del 0,8% representa un aumento de aproximadamente 300 millones de toneladas de CO₂, alcanzando un máximo histórico de 37,8 gigatoneladas de CO₂, y la **concentración media de CO₂ en la atmósfera** ha sido de aproximadamente de **422,5 ppm**, un nuevo récord en las concentraciones de gases de efecto invernadero.

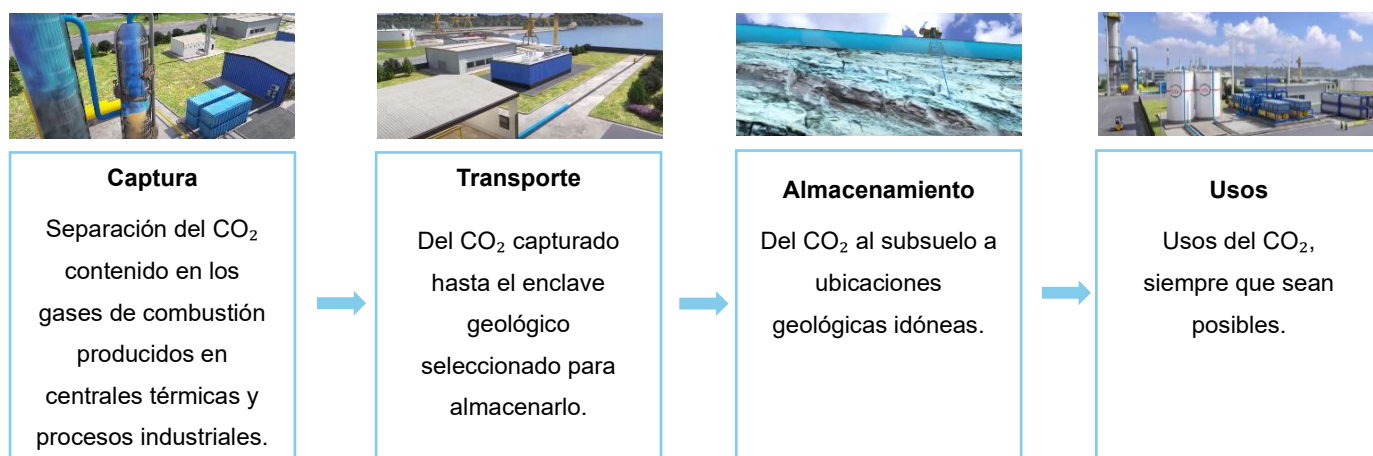
En la **Unión Europea**, según el análisis del CREA (Centre for Research on Energy and Clean Air), las **emisiones de CO₂** provenientes de combustibles fósiles **en 2024 disminuyeron un 2,9% respecto al año 2023**, con un **crecimiento del PIB europeo del 1%**, y se han reducido aproximadamente un 37% en comparación con los niveles de 1990, pero **aún queda por reducir un 18% adicional para llegar al objetivo de 2030**.

La eficiencia energética y las energías renovables, tanto la electricidad como la biomasa, serán el eje central de los esfuerzos para alcanzar la descarbonización de la UE, pero para diferentes sectores, entre ellos los correspondientes a la **industria de uso intensivo de energía**, será muy difícil que técnica y/o económicamente puedan utilizar energías renovables para descarbonizarse. Por lo tanto, **capturar, almacenar y utilizar el carbono** será **la única opción viable en las décadas siguientes**.

El CCUS debe entenderse como un complemento específico para los sectores y procesos donde las emisiones son intrínsecas al mismo proceso productivo (como en la fabricación de clínker de cemento, cal o determinados fertilizantes) o bien donde la combustión seguirá siendo necesaria durante décadas, como ocurre en la valorización energética de residuos o en algunos procesos siderúrgicos y de refinación. En estos casos, la captura, el uso y/o el almacenamiento de CO₂ permiten reducir de manera significativa unas emisiones que difícilmente se podrían eliminar sólo con eficiencia y electrificación.

Ya existe un consenso científico internacional de que la lucha contra el cambio climático necesita una combinación de soluciones entre las que aparece con fuerza la captura, el transporte, el almacenamiento, los usos y la transformación del CO₂ porque, entre otras cosas, difícilmente la humanidad podrá vivir sin carbono y de lo que se trata principalmente es de **desfosilizarse**, es decir, **evitar la extracción de mayor carbono de combustibles fósiles y utilizar el carbono de las mismas emisiones de CO₂**, que no se podrán evitar, para transformarlo en sus diferentes derivados.

A partir de ahí, este apartado se adentra en la definición y funcionamiento del CCUS, proporcionando una comprensión detallada de cómo estas tecnologías operan para mitigar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), uno de los principales gases de efecto invernadero que contribuye al cambio climático.



Fuente: elaboración propia

En primer lugar, exploraremos la captura de CO₂ que se realiza en las instalaciones industriales, incluyendo plantas de generación de energía y fábricas, donde el CO₂ es separado de los otros gases antes de que estos lleguen a la atmósfera.

El CO₂ contenido en los gases de combustión industriales se genera de forma muy intensa durante los procedimientos químicos utilizados para fabricar materiales como el

acero y el cemento y, también se produce, cuando se genera energía a partir de la combustión de carbono contenido en combustibles fósiles y orgánicos. Esto ocurre, por ejemplo, cuando se transforman residuos no reciclables en calor y electricidad. Por lo tanto, la combinación de la captura, uso y almacenamiento del CO₂ será básica en las próximas décadas para descarbonizar también el sector de los residuos.

Después, el CO₂ se puede transportar hasta su almacenamiento a profundidades subterráneas, o bien se puede utilizar como materia prima en la fabricación de productos industriales y/o combustibles sintéticos.

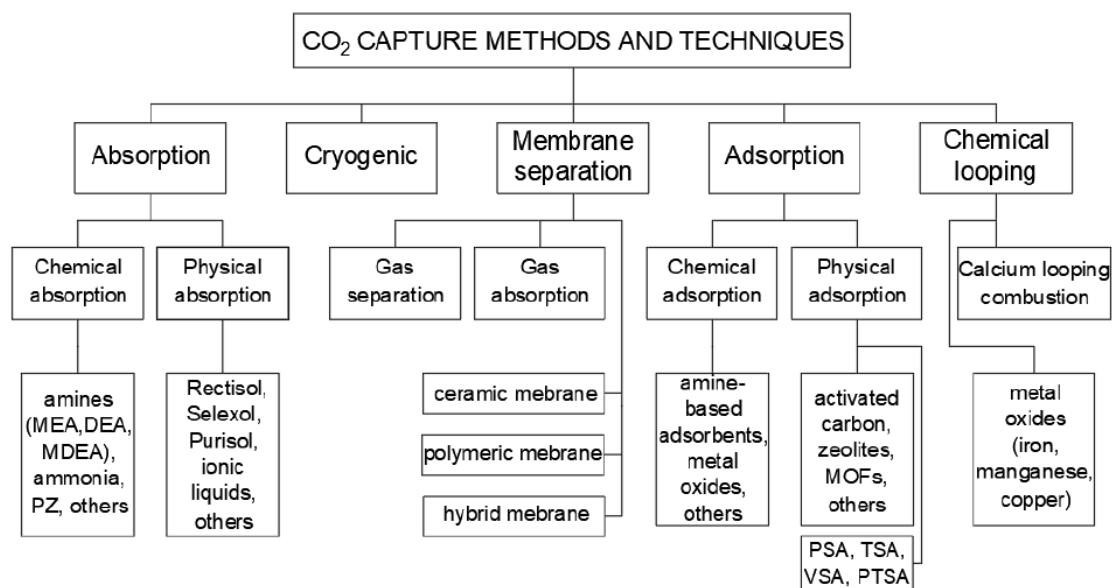
El seguimiento y la verificación del CO₂ capturado, transportado y almacenado deben hacerse según el Reglamento de Seguimiento y Notificación y el Reglamento de Verificación y Acreditación⁴ (**MRR** y **AVR**, respectivamente, por sus siglas en inglés). El MRR establece los criterios técnicos para cuantificar el CO₂ capturado, comprimido, transportado e inyectado. Por otra parte, el régimen de verificación de la AVR fija también los requisitos de acreditación de los verificadores independientes, su competencia técnica y la periodicidad de las auditorías. Este marco europeo asegura que la información declarada por las empresas que operan instalaciones de CCS es consistente, precisa y verificable, evitando dobles contabilizaciones y garantizando la integridad ambiental del sistema EU ETS.

Métodos y tecnologías de captura de CO₂

Básicamente, existen tres métodos de captura de CO₂: **captura de carbono precombustión**, por **oxicombustión** y **postcombustión**, en función de cómo se trata la fuente de carbono. De manera resumida, las tecnologías de precombustión implican la conversión del combustible en productos gaseosos como el hidrógeno y el monóxido de carbono, conocidos habitualmente como gas de síntesis (o "syngas"), que posteriormente mediante la reacción Water Gas Shift pueden producir CO₂ y H₂ con la adición de agua. Las tecnologías de oxicombustión consisten en quemar el combustible en presencia de oxígeno puro, eliminando el nitrógeno de la mezcla combustible y de esta manera, se obtiene una mezcla de CO₂ y agua, que se puede eliminar fácilmente por condensación, quedando el CO₂ puro. Y finalmente, las tecnologías de postcombustión permiten recuperar el CO₂ después de quemar el combustible. Más adelante, hablaremos en más detalle.

⁴ Reglamento de Ejecución (UE) 2018/2066 de la Comisión, de 19 de diciembre de 2018, sobre el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero en aplicación de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, y por el que se modifica el Reglamento (UE) núm. 601/2012 de la Comisión (MRR); y el Reglamento de Ejecución (UE) 2018/2067 de la Comisión, de 19 de diciembre de 2018, relativo a la verificación de los datos y a la acreditación de los verificadores de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (AVR).

Por otra parte, existen diferentes tecnologías de separación de CO₂, entre ellas:



Fuente: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - *Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies*. Energías 2022, 15, 887.

Una de las **tecnologías de separación** más avanzadas es la de **absorción mediante sorbentes líquidos**, también conocida como captura de carbono a base de disolventes, que utiliza habitualmente absorbentes líquidos como aminas, aunque últimamente también se están empleando líquidos iónicos u otros tipos de sorbentes. Las aminas presentan una alta capacidad de captura, una buena cinética de reacción y es una tecnología lo bastante madura, pero necesita mejorar la estabilidad de los disolventes, que tienden a descomponerse y formar compuestos tóxicos, son altamente corrosivos y el proceso de regeneración tiene un alto consumo energético. Los líquidos iónicos son sales líquidas a temperatura ambiente que presentan una alta afinidad por el CO₂, tienen una baja volatilidad y alta estabilidad térmica, pero tienen una alta viscosidad que dificulta su manipulación y su toxicidad y biodegradabilidad debe terminarse de evaluar. Otros tipos de sorbentes, como los orgánicos, presentan una baja corrosividad y la posibilidad de regeneración a temperaturas más bajas, pero también presentan una alta toxicidad y baja biodegradabilidad, así como hasta ahora una baja capacidad de captura.

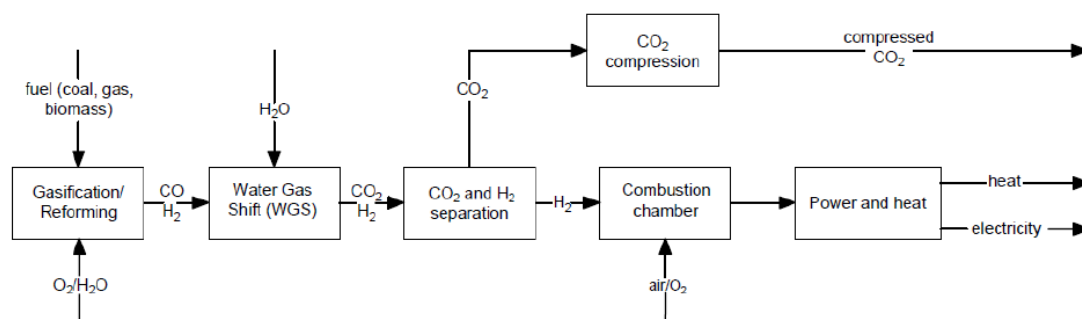
Otra tecnología de separación con proyección de futuro es la de **adsorción mediante sorbentes sólidos**, también conocida como captura de carbono en estado sólido, que utiliza habitualmente adsorbentes sólidos tipo MOFs (estructuras metal-orgánicas de alta porosidad y gran superficie específica, en inglés Metal–Organic Framework), zeolitas (materiales cristalinos con una estructura microporosa formados por átomos de silicio y aluminio unidos por átomos de oxígeno), materiales basados en carbono (carbón activo, nanotubos, grafeno, carbones porosos) o combinaciones de estos materiales con aminas

o líquidos iónicos soportados. Esta tecnología tiene diferentes retos de desarrollo que incluyen la optimización del rendimiento del material adsorbente, la mejora de la eficiencia energética de las etapas de captura y regeneración, la reducción de costes y la garantía de la compatibilidad con los diferentes procesos industriales.

Por otro lado, existen tecnologías de captura que combinan la captura y el uso a la vez, como sería la tecnología de **carbonatación** o mineralización donde se transforma el CO₂ capturado en minerales carbonatados estables. Esta tecnología tiene como objetivo almacenar CO₂ de manera permanente y al mismo tiempo producir materiales valiosos de baja huella de carbono que pueden servir para diferentes aplicaciones, por ejemplo, en el sector de la construcción. Los retos a abordar son diversos, como la disponibilidad de materiales alcalinos adecuados, la cinética de reacción, la escalabilidad del proceso y las aplicaciones de los productos finales, así como la integración energética del proceso para optimizar la eficiencia global.

Pasamos ahora a describir los diferentes **métodos de captura en función de si el CO₂ se captura antes o después de la combustión**.

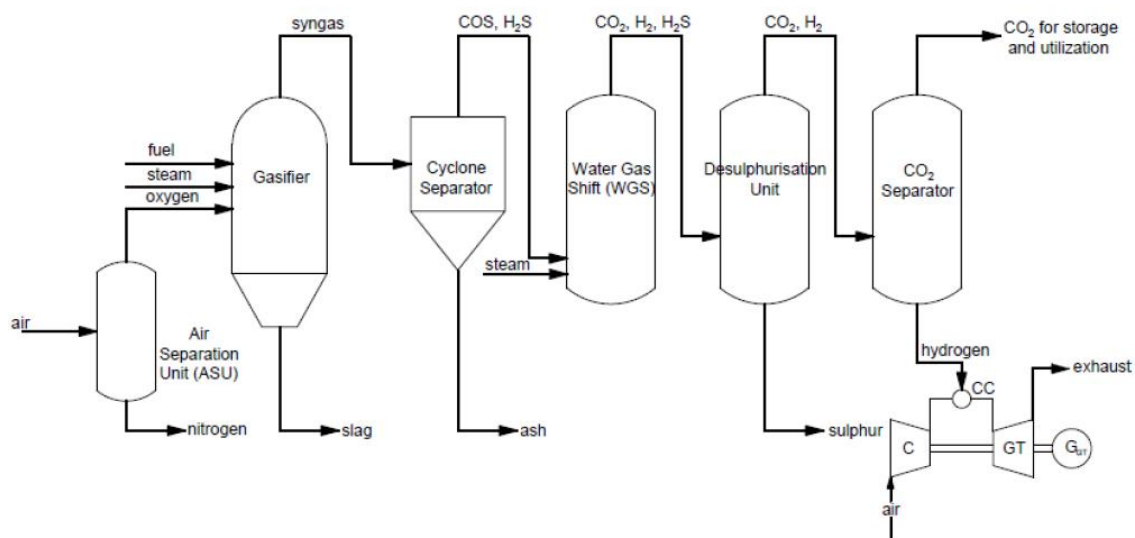
La **captura de carbono precombustión** tiene lugar antes del proceso de combustión mediante la gasificación del combustible con oxígeno, por ejemplo, la tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado, en inglés IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle). En este método, el combustible (carbón, gas, biomasa) no se quema completamente dentro del reactor, sino que se convierte en una mezcla de CO y H₂ durante el proceso de reformación o gasificación. Posteriormente, este gas de síntesis adicionando agua y mediante la reacción Water Gas Shift produce CO₂ y H₂. El hidrógeno se aprovecha energéticamente en una turbina de gas para producir electricidad, o bien se almacena para su uso posterior. Por otro lado, el CO₂ se separa para transportarlo y almacenarlo o usarlo.



Fuente: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - *Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies*. Energías 2022, 15, 887.

Este tipo de captura se aplica ampliamente en la producción de fertilizantes, productos químicos, combustibles gaseosos (H₂, CH₄) y producción de energía.

El esquema de la tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado (IGCC) para la generación de electricidad, utilizando una turbina de gas y la captura de CO₂ precombustión podría ser la siguiente:

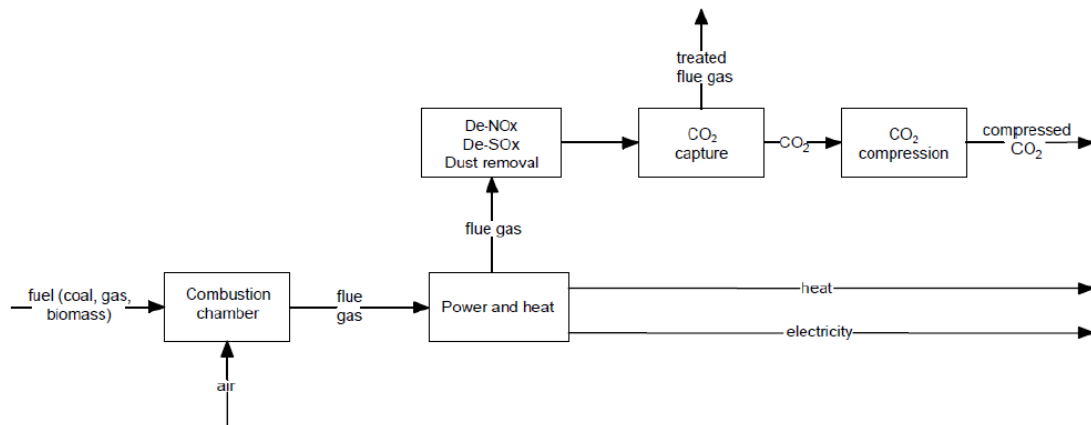


Fuente: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - *Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies*. *Energías* 2022, 15, 887.

El proceso de captura precombustión utiliza habitualmente tecnologías de captura físicas y químicas. Los absorbentes químicos, como los carbonatos, y los solventes físicos, como el polipropileno glicol y el metanol, se utilizan comercialmente en las industrias para capturar CO₂. El coste y el consumo energético de la captura de carbono dependen de la infraestructura y del proceso de captura. Una tecnología de captura de carbono precombustión con solventes o absorbentes efectivos puede conseguir capturar más del 90% del CO₂, pero, al mismo tiempo, reduce la eficiencia de la planta.

Los métodos de precombustión son muy efectivos en la separación de CO₂ debido a la alta concentración de CO₂ en el combustible antes de la combustión, pero son costosos debido a la necesidad de una unidad de gasificación.

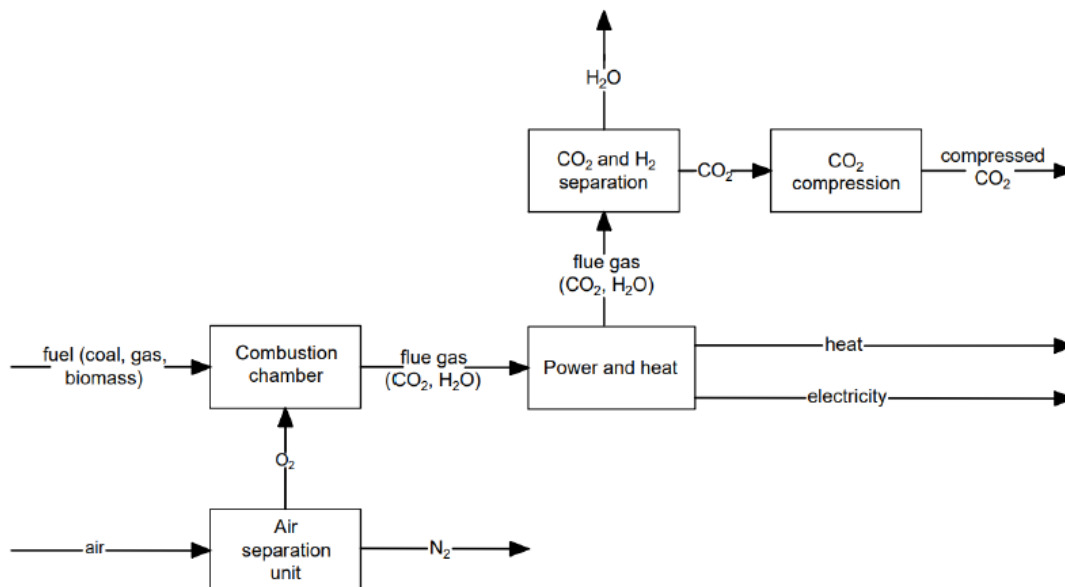
La **captura de carbono postcombustión** tiene lugar después del proceso de combustión. El CO₂ se separa de los gases generados después de la combustión convencional de combustibles fósiles. En este método de captura se utiliza habitualmente las tecnologías de captura por absorción química, adsorción física, separación con membranas o el uso de un bucle químico.



Fuente: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - *Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies*. *Energías* 2022, 15, 887.

Este es el esquema que se aplicaría a las centrales eléctricas de combustibles fósiles. El CO₂ se captura de los gases de combustión de las centrales eléctricas u otras fuentes puntuales. La tecnología está bien entendida y se utiliza actualmente en otras aplicaciones industriales, aunque en una escala mucho más pequeña.

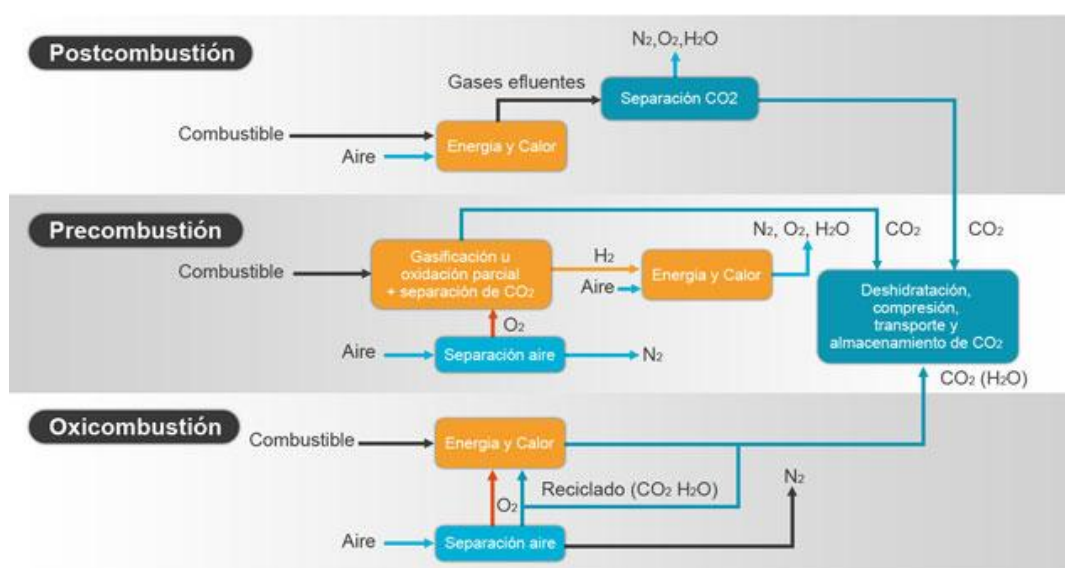
La **captura de carbono por oxidación** tiene lugar después del proceso de combustión en una atmósfera de oxígeno, separando el CO₂ generado durante el proceso de oxidación, por ejemplo, utilizando una turbina de gas de oxígeno. La atmósfera de oxígeno se puede obtener eliminando el nitrógeno del aire antes del proceso de combustión.



Fuente: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - *Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies*. *Energías* 2022, 15, 887.

En la combustión con oxígeno (oxicombustión), el combustible se quema en oxígeno puro en lugar de aire. Para limitar las temperaturas de llama resultantes a los niveles comunes durante la combustión convencional, el gas de combustión enfriado se recircula y se inyecta en la cámara de combustión. El gas de combustión consta principalmente de CO₂ y vapor de agua, este último se condensa mediante enfriamiento. El resultado es una corriente de CO₂ casi puro. Los procesos de las centrales eléctricas basados en la combustión con oxígeno se conocen a veces como ciclos "sin emisiones", ya que el CO₂ almacenado no es una fracción extraída de la corriente de gas de combustión (como en los casos de captura pre y postcombustión), sino de la propia corriente de gas de combustión. Una fracción del CO₂ acaba inevitablemente en el agua condensada. Para garantizar la etiqueta "sin emisiones", el agua debería ser tratada o eliminada adecuadamente.

En resumen, los tres métodos de captura de CO₂, ya descritos, que se utilizan más habitualmente para capturar el CO₂ en instalaciones industriales, antes de que llegue a la atmósfera, se podrían esquematizar y comparar de la siguiente manera:



Fuente: <https://pteCO2.es/captura/>

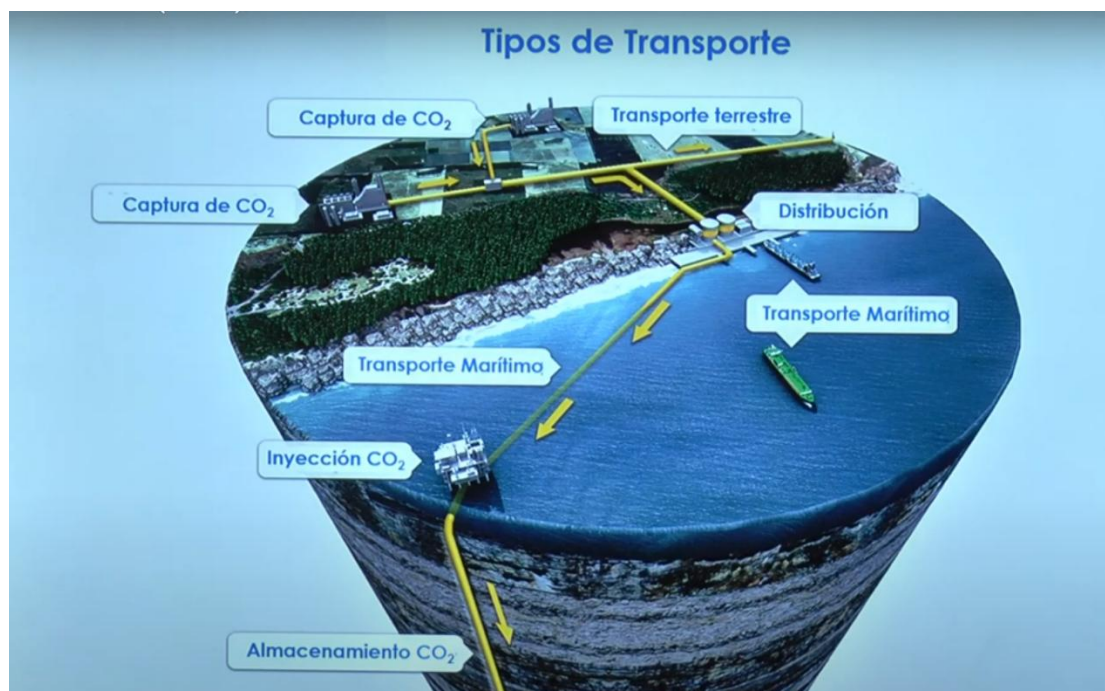
Por otra parte, otro método de captura de CO₂ alternativo a los anteriores, sería el de **captura directa del aire** ambiente que respiramos (en inglés DAC, Direct Air Capture). En este caso, sin embargo, la concentración más baja de CO₂ en el aire (sólo 422,5 ppm) en comparación con las fuentes de combustión (hasta 150.000 ppm en una central eléctrica con carbón) complica la ingeniería de proceso y, por tanto, hace que el proceso sea mucho más caro. Por lo tanto, capturar el CO₂ es más efectivo desde fuentes puntuales, como podrían ser grandes instalaciones de energía basadas en combustibles fósiles, industrias con emisiones importantes de CO₂ (por ejemplo, producción de cemento,

siderurgia o residuos), procesamiento de gas natural, plantas de combustible sintético y plantas de producción de hidrógeno basadas en combustibles fósiles.

De todas formas, un reto importante para tener en cuenta en cualquiera de estas tecnologías es que la captura y el tratamiento del CO₂ consumen mucha energía y sólo tiene sentido su aplicación si se hace con generación de energía verde.

Por otra parte, todas estas tecnologías también plantean retos y preocupaciones relevantes en el proceso posterior a la captura, como serían en las fases de **transporte y almacenamiento y usos del CO₂**.

A continuación, detallaremos los métodos de transporte del CO₂ capturado y comprimido, que generalmente incluyen su traslado a través de tuberías o por transporte marítimo o terrestre, hasta lugares donde puede ser definitivamente almacenado. La selección de la metodología de transporte depende de factores como la distancia, coste e infraestructura disponible.



Fuente: Global CCS Institute

Transporte:

Cuando el CO₂ comprimido debe transportarse a su lugar de almacenamiento existen básicamente tres opciones de transporte:

- A través de tuberías, también llamadas ceoductos, similares a los gasoductos utilizados por la industria del gas natural.
- Empleando camiones cisterna.

- Mediante barcos, sobre todo si la fuente de CO₂ está muy alejada del área de almacenamiento.
- Otras técnicas experimentales

Si nos centramos en la red de transporte de CO₂ por tuberías, ésta no debería parecerse obligatoriamente a la actual red de gas natural que da servicio a prácticamente todos los negocios de la UE y la mayoría de los edificios. La red de CO₂ debería focalizarse en los polos industriales, donde se produciría la demanda de captura y en la ubicación de los posibles emplazamientos de almacenamiento y uso.

En cualquier caso, será importante desarrollar un plan progresivo para el desarrollo de la red de transporte y del almacenamiento de CO₂ en Europa, para garantizar que, como mínimo, los polos industriales más importantes estén conectados antes de 2030, cuando es probable que el Régimen de Comercio de Derechos de Emisiones (EU ETS) se convierta en relevante para estas empresas.

Y hay que tener en cuenta, que la reutilización de tuberías de gas y petróleo no utilizadas también podría ser una opción para reducir significativamente las inversiones y acelerar la red de transporte de CO₂, para incrementar y hacer más viables los proyectos de CCS, por un lado, y para reducir el coste social y el impacto ambiental asociado con el desmantelamiento de estas instalaciones.

Almacenamiento:

En este apartado abordaremos las opciones de **almacenamiento del CO₂**, que a menudo implican la inyección del gas en formaciones geológicas subterráneas como campos de petróleo y de gas agotados o acuíferos salinos profundos. Esta fase del proceso es crucial para garantizar que el CO₂ se mantenga aislado de la atmósfera durante miles de años, contribuyendo así efectivamente a la reducción de las emisiones globales.

En estos depósitos subterráneos, que tienen suficiente capacidad para almacenar volúmenes muy grandes de CO₂, el dióxido de carbono se inyecta a una profundidad de 800 metros o más, llenando todo el espacio poroso del depósito subterráneo hasta alcanzar la capa de roca impermeable. A medida que la profundidad aumenta, se registra un incremento simultáneo a la presión y la temperatura. En estas condiciones, el CO₂ permanecerá atrapado en la roca durante miles de años. La seguridad en el lugar de almacenamiento se rige por los controles ambientales estrictos.

Las cavernas de sal terrestres también se plantean como una posible solución para el almacenamiento de hidrógeno. Numerosas investigaciones subrayan que se trata de una solución de almacenamiento permanente y segura.

La Comunicación de la Comisión sobre Ciclos del Carbono Sostenibles establece: "Los yacimientos de petróleo y gas agotados y los acuíferos salinos tienen el potencial de almacenar miles de millones de toneladas de CO₂ en emplazamientos en alta mar, y la unión del CO₂ a rocas basálticas u otros procesos de mineralización del dióxido de carbono son otras opciones potencialmente desplegables a gran escala".

Desde el punto de vista legal, hay que tener presente que los proyectos de almacenamiento geológico de CO₂, tal y como se definen en la Directiva 2009/31/CE, están sometidos a evaluación de impacto ambiental (AIA) de acuerdo con la Directiva 2011/92/UE, modificada por la Directiva 2014/52/UE. La AIA debe valorar la caracterización geológica, los riesgos de fugas y sismicidad, la protección de los acuíferos y los planes de seguimiento y clausura, garantizando la seguridad a largo plazo del almacenamiento.

En España, estas obligaciones se recogen en la referida Ley 21/2013, de evaluación ambiental, y en la Ley 40/2010, sobre almacenamiento geológico de CO₂, de manera que no puede otorgarse la autorización de explotación sin una declaración de impacto ambiental favorable.

Hay que tener presente, pero que, aunque la normativa europea no prohíbe almacenar CO₂ en cavernas de sal si se demuestra que el lugar es seguro, algunos países lo limitan o directamente no lo quieren hacer en tierra firme. Por ello, lo que se está impulsando más a corto plazo son almacenes mar adentro (sobre todo en el Mar del Norte), y será necesaria una buena red de transporte —tuberías y barcos— para llevar hasta allí el CO₂.

Usos del CO₂

El CO₂ capturado de procesos industriales tiene una variedad de usos que pueden contribuir a su reutilización y a la reducción del impacto ambiental. Estos usos se pueden dividir en uso directo (donde el CO₂ se utiliza en su forma capturada) y uso indirecto (donde se transforma en otros productos):

Usos directos:

- Producción de bebidas carbonatadas: El CO₂ se utiliza para crear las burbujas en bebidas como refrescos, cerveza y agua con gas.
- Inyección en campos petrolíferos: En la técnica de recuperación avanzada de petróleo (EOR, por sus siglas en inglés), el CO₂ se inyecta en los yacimientos para aumentar la presión y extraer petróleo residual.
- Industria alimentaria: Se utiliza en forma líquida o sólida (hielo seco) para refrigerar, conservar alimentos o envasar alimentos en atmósferas controladas.
- Fabricación de materiales: Se utiliza en procesos de fabricación de plásticos, como refrigerante industrial y en la fabricación de compuestos químicos como la urea.

- Fijación en materiales de construcción: El CO₂ capturado se puede utilizar para curar hormigón, incorporándolo permanentemente dentro de este material y mejorando sus propiedades mecánicas.
- Cultivo de algas: El CO₂ se utiliza como fuente de carbono para el crecimiento de algas, que se pueden utilizar para producir biocombustibles, alimentos u otros productos químicos.
- Gas medicinal: Se utiliza en cirugías laparoscópicas o para terapias respiratorias.
- Investigación en laboratorios: Se puede utilizar para simular condiciones de atmósferas específicas o en experimentos de fijación de carbono.

Usos indirectos como materia prima química:

- **Conversión a polímeros:** Se puede utilizar para fabricar plásticos y otros materiales poliméricos a través de reacciones con epóxidos.
- **Producción de combustibles sintéticos:** El CO₂ se puede transformar en metanol, etanol y otros combustibles sintéticos mediante procesos químicos con hidrógeno verde, ofreciendo una alternativa a los combustibles fósiles para las industrias y el sector del transporte de difícil electrificación, como podría ser el sector marítimo y la aviación.

Además de los procesos químicos convencionales, también se están desarrollando procesos electroquímicos para convertir CO₂ en metanol, etanol y otros productos químicos. Estos procesos ofrecen una solución más eficiente y adaptable, con la posibilidad de integrarlos con fuentes de energía renovable como el hidrógeno verde, potenciando aún más el carácter circular de las tecnologías CCUS.

Algunos ejemplos destacados incluyen: Electrólisis de CO₂ a metanol y etanol, mediante el uso de electrodos y catalizadores específicos, el CO₂ puede ser reducido a metanol y etanol, procesos que se pueden integrar directamente en las cadenas de producción industriales y contribuir a la descarbonización de los sectores que necesitan combustibles líquidos. Varias instalaciones están probando estas tecnologías electroquímicas a pequeña y mediana escala, para validar su viabilidad técnica y económica, con el objetivo de demostrar la capacidad de integrar estas soluciones en procesos industriales a gran escala.

Contexto internacional y local: análisis del marco global y cómo se posiciona el territorio en este ámbito

El cambio climático hace que la descarbonización de la economía sea una prioridad. Como ya se ha comentado, la captura, el transporte, el almacenamiento y uso del dióxido de carbono ayuda a limitar y eliminar las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Ofrecer la captura de CO₂ como alternativa nos permite aumentar nuestras soluciones para reducir la huella de carbono en sectores como el de la energía y el sector industrial.

El compromiso internacional consolidado por el Acuerdo de París de 2015 ha impulsado a numerosos países a adoptar tecnologías avanzadas de captura y almacenamiento de carbono (CCS) y, de manera creciente, también a explorar su utilización en procesos industriales (CCUS) como **herramientas clave para alcanzar sus objetivos de descarbonización**. En este sentido, el contexto internacional se caracteriza por una aceleración en el desarrollo de estas tecnologías, integrada en los esfuerzos globales para combatir el cambio climático, establecer metas ambiciosas de reducción de emisiones y situar la captura y gestión del CO₂ como una pieza clave en las estrategias climáticas nacionales.

A nivel mundial, CCS y CCU son consideradas herramientas críticas para alcanzar la neutralidad de carbono. Según **la Agencia Internacional de la Energía (IEA), cumplir con los objetivos climáticos para 2050 requerirá la captura y almacenamiento de aproximadamente 7,6 gigatoneladas anuales de CO₂**. Esta necesidad ha impulsado la creación de políticas de apoyo, subvenciones y marcos reguladores específicos en regiones clave como Estados Unidos, la Unión Europea y países líderes como Noruega, que están desarrollando proyectos a gran escala como el "Northern Lights", con la participación de importantes empresas energéticas.

Países como Estados Unidos, Canadá, Noruega y el Reino Unido han liderado la adopción de **tecnologías de CCS**, gracias en parte a su amplia experiencia en la industria petrolera y gasista, que facilita la infraestructura y el conocimiento técnico necesario para la gestión del CO₂. Estas naciones han implementado políticas favorables, como incentivos fiscales y apoyo a la investigación y desarrollo, que han estimulado la inversión tanto pública como privada en proyectos CCS.

Concretamente, en Estados Unidos, el Departamento de Energía tiene un programa con un presupuesto de aproximadamente 2.500 millones de dólares destinado al desarrollo de seis instalaciones de captura de carbono. El objetivo es mejorar la eficiencia, reducir costes, disminuir las emisiones y mejorar el rendimiento ambiental en el uso del carbón y del gas natural, así como la absorción de CO₂ de la atmósfera. En agosto de 2024, el Departamento anunció una inversión de 1.200 millones de dólares para las dos primeras

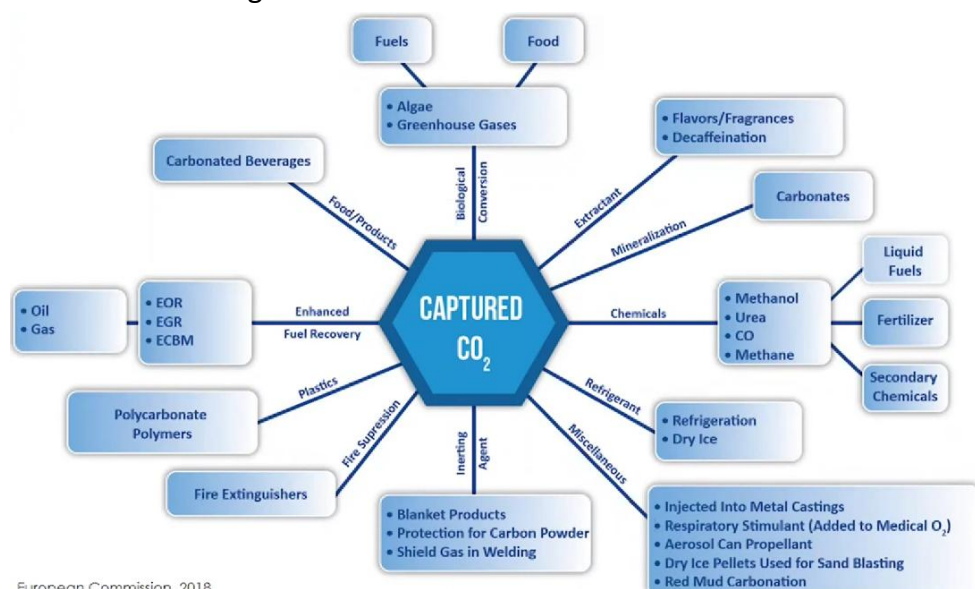
instalaciones de captura directa de carbono (DAC), con la intención de tener cuatro en total. Estas instalaciones destacan por la capacidad de absorber y almacenar hasta un millón de toneladas de CO₂ al año.

Por otra parte, en Asia, países como China y Corea del Sur también han incorporado la CCS en sus políticas energéticas nacionales, reconociendo su importancia para el logro de la neutralidad de carbono.

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) indicó recientemente que hay alrededor de 130 plantas DAC en desarrollo en todo el mundo, 27 de las cuales ya están operativas y 8 a punto de entrar en funcionamiento. Sin embargo, todas estas plantas son de pequeña escala y tienen una capacidad de eliminación de CO₂ mucho menor comparada con las instalaciones previstas en Estados Unidos.

En el ámbito europeo, la Comisión Europea ha reconocido la necesidad de una estructura legal robusta para el despliegue de la captura y el almacenamiento de carbono dentro de la estrategia industrial verde de la Unión Europea. Esta prioridad se ha materializado en la ya mencionada Ley sobre la Industria de Cero Emisiones Netas (**Net Zero Industry Act**). El objetivo es que, a partir de 2030, la UE disponga de una capacidad operativa de inyección de al menos 50 millones de toneladas de CO₂ anuales, con una contribución proporcional de cada estado según el volumen de sus emisiones.

Para alcanzar la neutralidad en carbono, la Unión Europea necesita capturar entre 300 y 600 millones de toneladas de CO₂ anualmente, según los expertos. **En España, se estima que se deberán capturar entre 35 y 40 millones de toneladas de CO₂ al año**, con aproximadamente 22 millones de toneladas provenientes de procesos industriales en sectores como los de fabricación del cemento, la cal, la dolomita y la magnesia. Estos sectores generan CO₂ al descomponer carbonatos para producir óxidos necesarios para sus productos. Además, 4 millones de toneladas más provienen de la petroquímica y la química orgánica, 4 millones más de la refinación de petróleo y aproximadamente 1 millón del sector siderúrgico.



European Commission, 2018

En el contexto de Cataluña, la región se encuentra en una **posición privilegiada para contribuir a las tendencias globales en descarbonización**. El país dispone de una **base industrial sólida** —especialmente en los sectores químico, energético y metalúrgico— que concentra una parte importante de las emisiones de CO₂ y que, al mismo tiempo, constituye un ámbito prioritario para el despliegue de tecnologías CCUS. Además, Cataluña cuenta con la **infraestructura industrial y las conexiones logísticas adecuadas** para impulsar proyectos integrados de captura y almacenamiento que podrían convertirse en referentes a escala europea. Este potencial se alinea con el **compromiso de la administración catalana con la sostenibilidad y la innovación tecnológica**, materializado en diversas iniciativas y planes de acción climática.

Por lo tanto, Cataluña debería considerar una **estrategia integrada** que combine **políticas de apoyo, inversión en investigación y desarrollo, alianzas estratégicas e iniciativas de sensibilización pública** para maximizar los beneficios de la CCS y la CCU. Este enlace entre el contexto local e internacional es crucial para posicionar a Cataluña como un líder en la transición hacia una economía baja en carbono.

Cataluña también está bien posicionada para aprovechar la financiación europea a través de programas como el Fondo de Transición Justa, que proporciona recursos para las regiones que buscan transformar sus economías hacia modelos más sostenibles. La existencia en Cataluña de centros de investigación, universidades y centros tecnológicos facilita la investigación y el desarrollo en CCU, convirtiendo el CO₂ en productos de valor añadido que podrían generar un nuevo sector industrial sostenible.

A modo de ejemplo, la Comisión Europea subvencionará con 205 millones de euros (205.061.582 euros), a cargo del Fondo de Innovación de la Unión Europea, el proyecto TarraCO₂, un almacén de CO₂ *offshore* frente a la costa de Tarragona (a unos 45 kilómetros en línea recta del polígono petroquímico de Tarragona), impulsado por Repsol. Se trata de uno de los 77 proyectos de descarbonización que acaban de firmar el convenio de subvención después de que, en octubre de 2024, se anunciaran los resultados de la convocatoria de 2023. En el caso del proyecto TarraCO₂, con entrada en funcionamiento prevista para el 31 de diciembre de 2030, la CE calcula que esta infraestructura será capaz de almacenar unos 2 millones de toneladas de CO₂ equivalente al año, hasta una capacidad máxima de 54 millones de toneladas.

Casos de éxito: ejemplos de proyectos o industrias que implementan CCUS

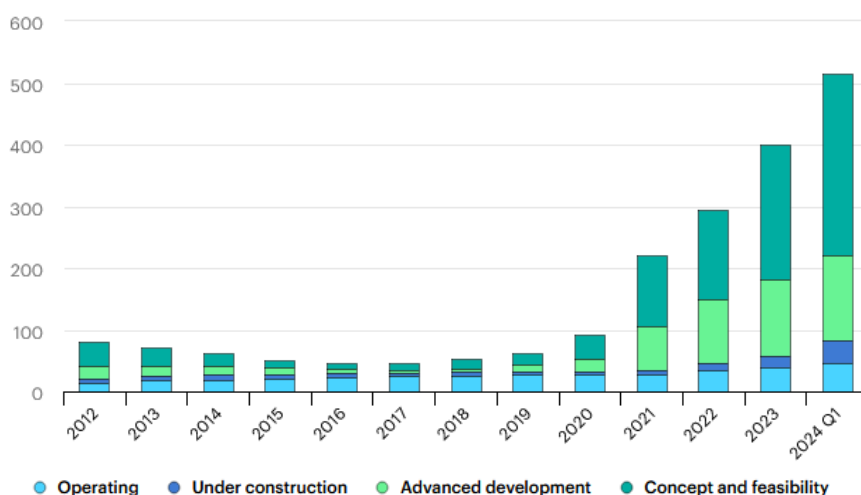
Las cifras de proyectos de captura y utilización de CO₂ ofrecen una proyección de crecimiento exponencial en los próximos cinco años, hasta 2030. Según datos de la **Agencia Internacional de la Energía (IEA)**, actualmente las **plantas de CCUS en todo el mundo capturan anualmente más de 50 Mt de CO₂**. Existen un total de **45 plantas comerciales de captura operando en el mundo**, de las cuales diez son de escala grande (con capacidades por encima de los 100 Mt CO₂ /año y por encima de las 1000 t CO₂ /año para aplicaciones de captura directa del aire (DAC), que entraron en operación en 2023).

A partir del año 2022, una vez superada la pandemia de COVID-19, se activaron los proyectos en desarrollo a nivel mundial y según las proyecciones del IEA, entre los proyectos en operación, desarrollo y estudio, se superarán las 400 Mt CO₂ /año de capacidad de captura. No obstante, como podemos observar en la figura siguiente, estamos lejos de las más de 1000 Mt CO₂ /año necesarias para conseguir el objetivo de emisiones netas cero para 2030.

Con ello, el mensaje que queremos transmitir es que son necesarios más esfuerzos a todos los niveles, no solo para capturar el CO₂ desde las fuentes de emisión, sino también para trabajar en el desarrollo de nuevas tecnologías y en escalabilidad de estas.

El número de plantas de captura de CO₂ no ha dejado de crecer desde el último lustro, sobre todo en fase de desarrollo y estudio, habiendo experimentado un crecimiento exponencial desde el año 2020. Es destacable, según los datos del IEA, el número de proyectos en desarrollo y estudio, en términos absolutos, más de 400 en todo el mundo.

Number of capture facilities



Fuente: IEA.org

Para destacar algunos ejemplos de proyectos operativos, en **EE. UU.** hay varios proyectos operativos, como el Blue Flint Ethanol Project, Linde Clear Lake capture, entre otros. En China, hay cuatro proyectos de gran capacidad, como el Jiling Petrochemical CCUS Facility, el CNOCC, la primera fase del Guanghai Energy CCUS integration Project y la planta de generación de energía China Energy Taizhou, esta última con una capacidad de captura de 500kt/año de CO₂.

En cuanto al **almacenamiento en Europa**, actualmente **Noruega** tiene el liderazgo, con los proyectos **Sleipner** (en operación desde 1996, ~1 Mt/año) y **Snøhvit** (desde 2008, hasta ~0,7 Mt/año), y recientemente con **Northern Lights**, la primera infraestructura abierta a terceros para transporte y almacenamiento, que inició las inyecciones el 25 de agosto de 2025. En este último proyecto, el CO₂ capturado se entrega por barco en la terminal de Øygarden y se conduce por una tubería submarina de unos 100 km hasta el reservorio Aurora, situado a unos 2.600 m bajo el fondo marino. La Fase 1 tiene una capacidad de 1,5 Mt/año y ya se ha aprobado la expansión a ≥5 Mt/año a partir de 2028. Entre los primeros clientes encontramos Yara Sluiskil (Países Bajos), con un acuerdo comercial para unos 800.000 t/año de CO₂.

En los **Países Bajos** el proyecto **Porthos** está en construcción y prevé entrar en servicio en 2026 con 2,5 Mt/año de almacenamiento en campos de gas agotados en el mar del Norte. El proyecto Athos se canceló en 2021 después de que Tata Steel optase por la vía de acero con DRI de hidrógeno. En paralelo, **Aramis** avanza como infraestructura de transporte y almacenamiento con objetivo operativo hacia 2030.

En **Dinamarca**, **Greensand** tiene certificada una Fase 1 de 0,3–0,4 Mt/año (inicio previsto finales 2025/inicios 2026) con potencial de escalado hasta 8 Mt/año en 2030 en el campo agotado Nini West; el proyecto **Bifrost** avanza como nuevo *hub* de almacenamiento en el mar del Norte.

En el **Reino Unido**, los clústeres **Track-1 (East Coast Cluster/Net Zero Teesside y HyNet North West)** han alcanzado hitos regulatorios y de contratación; la entrada en operación de los primeros proyectos con captura y almacenamiento se espera alrededor de 2028. **H21 Leeds** continúa como programa de conversión a hidrógeno asociado a los clústeres, complementando la infraestructura CCS.

En **Italia**, **Ravenna CCS** inició en 2024 la Fase 1 (aprox. 25.000 t/año) con plan de escalar hasta ~4 Mt/año en 2030, utilizando campos de gas agotados en el Adriático como almacén.

En **Francia**, en la vertiente norte de los Pirineos, el programa transfronterizo **PyCASSO** se ha concebido para desplegar toda la cadena **CCUS** para la industria del suroeste de Francia y el norte de España, con un uso prioritario de yacimientos agotados; su materialización depende de decisiones regulatorias y de compromisos industriales.

Es relevante destacar que **Noruega** almacena el CO₂ principalmente en **acuíferos salinos profundos** (Utsira a Sleipner; Johansen/Cook a Northern Lights; formaciones salinas en Snøhvit), mientras que en el resto de Europa los proyectos en marcha o en construcción utilizan mayoritariamente **campos de petróleo y gas agotados** (Porthos, Greensand, Ravenna, entre otros).

En conjunto, el **pipeline europeo de CCS** ha crecido con fuerza en los últimos años —con hitos como la puesta en marcha de Northern Lights (2025) y el inicio de obras de Porthos (2024)— dentro de una aceleración global del sector reportada por el Global CCS Institute.

En España, el IGME-CSIC ha cartografiado **103 acuíferos salinos profundos** como emplazamientos potenciales de almacenamiento y mantiene un visor cartográfico específico de los posibles almacenes geológicos de CO₂. Las estimaciones recientes sitúan la **capacidad total** de almacenamiento en un rango **12–44 Gt CO₂**, por encima de las cifras utilizadas años atrás.

En cuanto a proyectos, el **piloto de Hontomín** (Burgos) ha realizado ensayos de inyección en fase líquida y se utiliza como infraestructura de I+D (no es un almacén comercial). En paralelo, el IGME impulsa el proyecto **SEASTORAGE** para evaluar reservas *offshore* en las plataformas cantábrica y mediterránea, mientras que se exploran soluciones logísticas para licuar y exportar CO₂ desde terminales energéticas como Saggas (Sagunto) y BBG (Bilbao) hacia *hubs* de almacenamiento europeos.

En planificación estratégica, el proyecto europeo **STRATEGY CCUS** (H2020, 2019–2022) definió la hoja de ruta regional para el CCUS en la Cuenca del Ebro (Tarragona–Norte Castellón–Norte Teruel), identificando opciones de almacenamiento *onshore* y enlaces de transporte con la red existente. Y el proyecto **PilotSTRATEGY** (2021–2026) está profundizando en la geocaracterización de los acuíferos salinos profundos y en el diseño de pilotos en tres regiones prioritarias (Cuenca de París, Cuenca Lusitana y Cuenca del Ebro) con el objetivo de llegar a la fase pre-FID y a la solicitud de permisos antes de acabar el proyecto.

Manteniendo el foco en **España**, ya hay plantas industriales que capturan el CO₂ como proceso secundario como subproducto de la producción de hidrógeno por reformado de gas natural, como la planta HyCo de Carburos Metálicos en Tarragona.

Además de las plantas industriales, existen proyectos operativos de plantas de pequeña capacidad donde actualmente se está probando la viabilidad de estas tecnologías de captura de CO₂. Algunos ejemplos son la planta de Holcim en Carboneras (Almería), el Centro de Desarrollo de Tecnologías de Captura de CO₂ (CIUDEN, Cubillos del Sil, León), que separa el CO₂ mediante oxidación, o la planta de Captura y Reutilización de CO₂, que recupera el CO₂ emitido por una planta de biomasa y lo purifica en Garray (Soria).

También hay que tener en cuenta los proyectos futuros englobados dentro de los valles del hidrógeno y otras iniciativas privadas, las cuales requieren grandes cantidades de CO₂, de origen biogénico o no, y que se sumarán en los próximos años a las capacidades de captura cada vez más crecientes.

En este sentido, en **Cataluña**, la Generalitat se siente orgullosa del proyecto del **Valle del Hidrógeno**, que busca fomentar el desarrollo del hidrógeno verde como una fuente de energía limpia y sostenible, promoviendo su producción, almacenamiento y uso en diversos sectores industriales y de transporte.

Además, la Generalitat, a través del Departamento de Acción Climática, Alimentación y Agenda Rural, ha desarrollado la **Estrategia de Hidrógeno de Cataluña 2020-2030**. Esta estrategia tiene como objetivo posicionar a Cataluña como líder en la producción y la utilización del hidrógeno verde, impulsando proyectos de investigación, desarrollo e innovación, así como la creación de infraestructuras necesarias para su implementación.

La perspectiva energética de Cataluña para 2050, asumida por el Departamento de Acción Climática, **se centra en alcanzar una economía neutra en carbono**, mejorar su eficiencia energética y aumentar la cuota de energías renovables. Esta visión a largo plazo incluye medidas para promover la electrificación del transporte, mejorar la eficiencia de los edificios y fomentar la economía circular. La Generalitat está trabajando en la integración de tecnologías avanzadas y soluciones innovadoras para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar un suministro energético sostenible y resiliente.

Por otra parte, del presupuesto de la Generalitat del ejercicio 2023, el departamento de Investigación y Universidades asignó una partida de 5 millones de euros al Instituto Catalán de Investigación Química (ICIQ) con el fin de empezar a poner en marcha el **Centro de Descarbonización de la industria catalana**, ubicado en Tarragona. Esta iniciativa, que debe ser público-privada, se focalizará principalmente en los **sectores de difícil abatimiento del CO₂**, sectores como el **petroquímico, cementero, metalúrgico** y de los **residuos**.

El primer proyecto resultante de esta dotación presupuestaria comenzó el año pasado con la licitación del diseño de cuatro plantas piloto de ensayo móviles, cada una con una tecnología diferente: tres tecnologías de captura de CO₂ (adsorción con sólidos, absorción con líquidos y carbonatación) y una tecnología de conversión de CO₂ a productos de alto valor añadido. Esta última planta con tecnología dual Reverse Water Gas Shift y Fischer-Tropsch, diseñada por el Centro Tecnológico Eurecat y la ingeniería Cirauqui, igual que el resto, se prevé que se pueda construir y poner en funcionamiento en el año 2026. Todas estas cuatro primeras plantas piloto están pensadas para ubicarse, de manera temporal, en diferentes industrias con el fin de evaluar qué tecnología de captura y uso es la más adecuada en cada sector, en función de sus emisiones y de la

valorización que quieran hacer del CO₂ capturado y así, posteriormente, las empresas puedan invertir en la planta a escala industrial más adecuada con un riesgo menor. Hay que tener presente que las plantas industriales de tecnologías CCU son inversiones de muchos millones de euros y que pueden superar incluso las inversiones de las propias plantas productivas.

Adicionalmente, este proyecto de descarbonización industrial para las industrias catalanas intensivas en energía y de difícil abatimiento del CO₂, ha sido incluido dentro de la reprogramación del Programa FEDER de Cataluña 2021-2027, como uno de los proyectos estratégicos de alto impacto tecnológico surgidos de la iniciativa STEP de la Comisión Europea, con un fondo presupuestario adicional para construir las otras tres plantas de captura y para poder acabar de consolidar el Centro de Descarbonización de Cataluña.

Para que estos proyectos tengan éxito, será **necesario desarrollar nuevas tecnologías, probarlas a escala planta piloto y estudiar la viabilidad en planta** de muchas de estas iniciativas. En este punto, en Cataluña, un centro tecnológico como **Eurecat** puede jugar un papel muy importante, siendo el socio facilitador de la tecnología, los procesos y los conocimientos necesarios para aumentar la viabilidad técnica y económica de estos proyectos. Son una herramienta clave, no sólo para contribuir a la reducción de emisiones y la producción de nuevos combustibles, sino también para poner a punto y demostrar a escala industrial que es posible una forma diferente de producir combustibles, sin tener que depender, o al menos reducir en la medida de lo posible, la dependencia de países terceros exportadores de combustibles de origen fósil.

Repercusiones económicas: análisis del impacto económico, incluyendo la creación de oportunidades laborales y el desarrollo de nuevos mercados

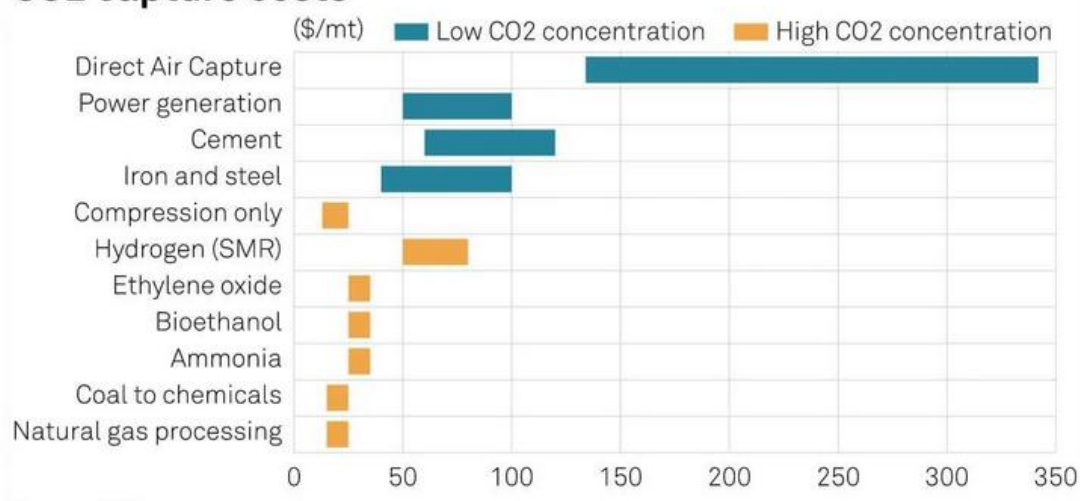
La transición hacia una economía descarbonizada en el contexto actual de cambio climático y políticas internacionales tiene un impacto económico significativo, así como el potencial de generar nuevas oportunidades laborales y desarrollar nuevos mercados. A continuación, se presenta un análisis detallado de estos aspectos:

Impacto económico:

- 1. Inversiones sustanciales:** Las inversiones en tecnologías de descarbonización, como la captura y almacenamiento de carbono (CCS), son impresionantes. Por ejemplo, los Estados Unidos han destinado 135.000 millones de dólares para reducir emisiones del sector industrial. Además, el Departamento de Energía ha invertido 2.500 millones de dólares en seis instalaciones de captura de carbono y 1.200 millones más en plantas de captura directa de carbono (DAC). Estas inversiones no sólo tienen el potencial de reducir significativamente las emisiones, sino que también **estimulan la economía al generar demanda para nuevas tecnologías y servicios**.
- 2. Eficiencia y reducción de costes:** La implementación de tecnologías de descarbonización puede mejorar la eficiencia y reducir los costes a largo plazo en sectores industriales clave, como el cemento, el acero, la petroquímica o la generación eléctrica, así como también la producción de hidrógeno verde. A medida que estas tecnologías se desarrollan y se escalan, los costes de implementación disminuirán, contribuyendo a que la transición sea económicamente más viable.
- 3. Viabilidad económica y comparativa CCS vs. CCU:** Como ya se ha mencionado, las tecnologías de captura de CO₂ utilizadas en la fuente de emisiones deben tener en cuenta dos factores esenciales: la tecnología más adecuada según la concentración de CO₂ en la corriente de entrada, así como su naturaleza e impurezas, y el uso final, que puede ser para almacenamiento (CCS) o para utilización (CCU). El impacto que tendrá sobre el coste por tonelada dependerá claramente del precio del producto de valor añadido que seamos capaces de producir y comercializar, que puede ir desde el propio CO₂ hasta combustibles sintéticos o fertilizantes como el metanol, el metano, las parafinas o la urea. A la hora de calcular el coste, además de los parámetros asociados a la energía, la infraestructura y la operación, hay que tener en cuenta el precio de los derechos de emisión de CO₂ (si provienen de una fuente no biogénica), que actúan como una palanca en muchos casos. Durante los primeros meses del conflicto en Ucrania, los derechos de emisión superaron los 100 €/ton, ya

que están correlacionados con el precio del gas. Actualmente, en abril de 2025, cotizan a 60 €/ton. Hay que tener en cuenta que el derecho de emisión es un factor que hay que considerar principalmente cuando el objetivo final del CO₂ sea su almacenamiento. Podemos llegar a la situación en que la suma de los costes de captura, transporte y almacenamiento supere el coste del derecho de emisión y, en términos estrictamente financieros, sea más favorable emitir el CO₂. Por ello, son necesarios incentivos y regulaciones para garantizar que la viabilidad de un proceso de captura no dependa únicamente de un indicador volátil como es el derecho de emisión. En algunas aplicaciones como, por ejemplo, la EOR utilizada en EE. UU. para obtener más petróleo de pozos a final de su ciclo, se pueden gestionar costes tan bajos como 2-14 \$/ton. Dependiendo del precio del crudo y otros factores, el coste de este almacenamiento puede incluso ser negativo si el precio del crudo extraído compensa la operación. Si no tenemos en cuenta esta variable, y comparamos todos los procesos industriales en los que se captura CO₂ como parte del mismo proceso productivo con capturas en procesos donde hasta ahora no se había capturado (por ejemplo, siderurgia, producción de cemento o generación de energía), nos encontramos con que la horquilla de precios varía entre 9-28 €/ton por procesos de alta concentración de CO₂, asociados a productos químicos, hasta más de 100 €/ton en el caso de la industria cementera.

CO₂ capture costs



Fuente: IEA

En el caso de las tecnologías basadas en captura directa del aire (DAC), la horquilla es aún más amplia, superando los 120 €/ton hasta valores por encima de los 330 €/ton.

Como hemos mencionado anteriormente, existe una correlación directa entre el coste de la captura de CO₂ y la concentración de CO₂ presente en el proceso, así como

si este coste final puede amortizarse con la producción de productos de valor añadido, además de la madurez tecnológica de los mismos. Serían aquellas industrias químicas donde se captura CO₂ en alta concentración y se utilizan procesos maduros a escala suficiente, como la captura con aminas o la compresión criogénica.

En aquellas industrias donde las concentraciones son más bajas y los focos de emisión suelen tener más contaminantes (p. ej. óxidos de nitrógeno y azufre, partículas), se requieren procesos adicionales de limpieza y pretratamiento, además de una recuperación de calor extra para enfriar los gases a temperaturas admisibles por las tecnologías. Todo esto tiene un impacto directo sobre el coste de captura por tonelada.

Para que los procesos de captura de CO₂ sean viables desde un punto de vista técnico y económico, es necesario mejorar la eficiencia de estos procesos mediante nuevos materiales y sorbentes, que aumenten la capacidad de recuperación de CO₂ de estas plantas y la eficiencia energética, que tendrá un impacto directo sobre los costes operativos de las plantas y, por tanto, sobre el coste de captura del CO₂.

Otro aspecto importante es el desarrollo del mercado de los combustibles sintéticos que utilicen este CO₂ capturado, como el metanol que se puede producir a partir de hidrógeno electrolítico y este CO₂. Actualmente, debe competir con el metanol producido en diferentes economías globales con horquillas de precios entre 365-625 €/ton, cuando los costes actuales de este metanol "verde" se mueven entre los 900-1000 €/ton. Por lo tanto, será necesario incentivar su uso, ya sea de forma directa mediante subvenciones a la producción y el uso, como los mecanismos que hace unos años se están implementando, que obligan a incluir un porcentaje de combustibles renovables en los combustibles de uso terrestre, aéreo y marítimo.

Así, pues, la transición hacia una economía descarbonizada no sólo representa una respuesta crucial ante la urgencia del cambio climático, sino que también se erige en un motor de transformación económica a escala global. Este cambio de paradigma, sustentado en inversiones estratégicas y la adopción progresiva de tecnologías de vanguardia, desencadena una serie de impactos económicos de gran alcance.

Por un lado, se generan oportunidades laborales en sectores antes relegados, ahora en ascenso gracias a la demanda de mano de obra especializada en áreas como la ingeniería ambiental, la gestión de residuos y la eficiencia energética. Esta dinámica no sólo revitaliza el mercado laboral, sino que también fomenta la creación de puestos de trabajo de calidad y el desarrollo de habilidades pertinentes para el futuro.

Por otro lado, la transición hacia una economía descarbonizada impulsa la innovación y el surgimiento de nuevos mercados donde la sostenibilidad y la ecoeficiencia son valores primordiales. Desde la producción de energías renovables hasta la fabricación de tecnologías limpias y comercialización de productos y servicios eco-amigables, se abre

un abanico de oportunidades para empresas y emprendedores comprometidos con un desarrollo más equitativo y sostenible. Sin embargo, para que estos beneficios se materialicen plenamente, es imperativo un enfoque integrado que articule políticas globales coherentes con acciones locales concretas. La colaboración entre gobiernos, instituciones, empresas y la sociedad civil es fundamental para garantizar una transición justa y equitativa, donde nadie quede atrasado y todo el mundo pueda participar activamente en la construcción de un futuro más próspero y respetuoso con el medio ambiente.

Análisis de industrias relacionadas: evaluación de cómo las CCUS pueden beneficiar o transformar industrias emisoras clave

La captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) son tecnologías cruciales para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y mitigar el cambio climático. Las industrias clave que emiten grandes cantidades de CO₂ y son candidatas para implementar tecnologías de CCUS incluyen:

GENERACIÓN DE ENERGÍA:

1. **Plantas de energía a base de carbón y gas natural:** Son una de las fuentes principales de emisiones de CO₂ debido a la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad.
2. **Industria del cemento:** La producción de cemento es una fuente significativa de emisiones de CO₂ debido a la descomposición del carbonato de calcio (caliza) y del uso intensivo de energía en el proceso de producción.
3. **Industria del acero:** La fabricación de acero, especialmente en los altos hornos, genera grandes cantidades de CO₂ debido a la reducción de mineral de hierro mediante coque (un derivado del carbón).
4. **Industria química:** La producción de productos químicos como el amoníaco y el etileno implica procesos que liberan CO₂ como subproducto. Estas industrias también consumen grandes cantidades de energía.
5. **Refinación de petróleo:** Las refinerías de petróleo emiten CO₂ durante el procesamiento del crudo para producir combustibles y otros productos derivados.
6. **Industria del papel y pulpa:** La producción de papel y pulpa también contribuye a las emisiones de CO₂, aunque en grado más bajo en comparación de las industrias anteriores.
7. **Plantas de valorización energética de residuos**

Beneficios y transformaciones de las CCUS a estas industrias:

BENEFICIOS:

1. **Reducción de emisiones y cumplimiento normativo:**
 - **Cumplimiento con regulaciones ambientales:** Las industrias pueden cumplir las normativas ambientales y los objetivos de reducción de emisiones establecidos por gobiernos y organismos internacionales, evitando multas y sanciones.
 - **Mejora de la imagen corporativa:** Adoptar CCUS puede mejorar la reputación de una empresa como líder en sostenibilidad y responsabilidad ambiental, atrayendo inversores y clientes conscientes con el medio ambiente.

2. Aprovechamiento de incentivos financieros:

- **Subsidios y créditos fiscales:** Muchos gobiernos ofrecen incentivos financieros, como subsidios y créditos fiscales, para la implementación de tecnologías de CCUS.
- **Participación en mercados de carbono:** las empresas pueden vender créditos de carbono obtenidos por la reducción de emisiones y generar ingresos adicionales.

3. Innovación y competitividad:

- **Desarrollo de nuevas tecnologías:** La adopción de CCUS puede impulsar la innovación en tecnologías limpias y eficientes, posicionando a las empresas a la vanguardia de la transición energética.
- **Ventaja competitiva:** Las empresas que implementen CCUS pueden obtener una ventaja competitiva al adelantarse a futuras regulaciones más estrictas y demostrar su compromiso con la sostenibilidad y el medio ambiente.

TRANSFORMACIONES:

1. Cambio en procesos operativos:

- **Optimización de procesos:** La integración de CCUS puede llevar a optimizar procesos industriales para maximizar la captura de CO₂ y mejorar la eficiencia energética.
- **Desarrollo de nuevas infraestructuras:** Se requiere la construcción de infraestructuras adicionales para la captura, el transporte y el almacenamiento de CO₂, lo que puede generar empleo y estimular la economía local.

2. Diversificación de productos y servicios:

- **Valorización del CO₂ capturado:** El CO₂ capturado puede ser utilizado en la producción de productos valiosos, como combustibles sintéticos, materiales de construcción y productos químicos, abriendo nuevas líneas de negocio.
- **Servicios de CCUS para terceros:** Las empresas pueden ofrecer servicios de CCUS a otras industrias, creando una nueva fuente de ingresos.

3. Sostenibilidad y adaptación al cambio climático:

- **Contribución a la mitigación del cambio climático:** Al reducir las emisiones de CO₂, las industrias contribuyen de manera significativa a la lucha contra el cambio climático, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad.
- **Resiliencia a largo plazo:** Las industrias que adopten sistemas de CCUS estarán mejor preparadas para un futuro en el que las regulaciones ambientales sean más estrictas y el coste de las emisiones de carbono sea mayor.

Así, pues, la implementación de CCUS no sólo ayuda a las industrias a reducir sus emisiones de CO₂ y cumplir las regulaciones ambientales, sino que también puede transformar sus operaciones, abrir nuevas oportunidades de negocio y mejorar su competitividad y sostenibilidad a largo plazo.

Retos y Oportunidades: identificación de barreras normativas, técnicas, estratégicas y políticas, y explorar las oportunidades asociadas

La introducción del hidrógeno como vector energético y la captura de carbono presentan una oportunidad única para desarrollar una nueva cadena de valor industrial e infraestructuras esenciales en Cataluña y España. Sin embargo, este proceso enfrenta múltiples desafíos y ofrece varias oportunidades en el ámbito regulatorio, técnico, estratégico y político.

OPORTUNIDADES

Desarrollo industrial y reindustrialización:

- **Generación de empleo:** La creación de nuevas infraestructuras para la captura, el transporte y el almacenamiento de CO₂ y para la producción y la distribución de hidrógeno puede generar una gran cantidad de puestos de trabajo directos e indirectos. Estos puestos de trabajo pueden abarcar desde la construcción y el mantenimiento de las infraestructuras hasta roles en investigación, desarrollo y operaciones.
- **Atracción de inversiones:** La transición hacia una economía verde atraerá inversiones nacionales e internacionales. Empresas del sector energético, tecnológico y de ingeniería estarán interesadas en participar en estos proyectos, lo que fomentará el crecimiento económico.
- **Modernización industrial:** La implementación de estas nuevas tecnologías puede catalizar la modernización de la industria existente, haciéndola más eficiente y menos dependiente de los combustibles fósiles. Esto puede aumentar la competitividad de las industrias locales en el mercado global.
- **Infraestructura y servicios:** La construcción y la operación de infraestructuras de captura, uso y almacenamiento de carbono requieren el desarrollo de una red logística y de servicios asociados. Esto incluye la creación de instalaciones de almacenamiento, sistemas de transporte de CO₂ y servicios de mantenimiento y monitorización, contribuyendo al desarrollo de un robusto ecosistema económico.

Expansión del mercado:

- **Crecimiento del sector de captura de carbono:** Se estima que el mercado de captura de carbono podría crecer significativamente en los próximos años. España, al invertir en investigación y desarrollo, se puede posicionar como líder en este sector emergente, ofreciendo tecnologías y soluciones avanzadas a nivel mundial.

- **Desarrollo de nuevos productos y servicios:** La captura y utilización del carbono (CCU) puede dar lugar a la creación de nuevos productos, como materiales de construcción más sostenibles, combustibles sintéticos y productos químicos. Esto diversificará la economía y abrirá nuevas oportunidades comerciales.
- **Exportación de tecnología:** España tiene la oportunidad de desarrollar tecnologías avanzadas que no sólo se utilicen a escala local, sino que también se exporten a otros países, fortaleciendo su posición en el mercado global de tecnologías limpias.

Mitigación del cambio climático:

- **Reducción de emisiones:** Implementando tecnologías CCUS en la industria intensiva en emisiones de CO₂, Cataluña y España pueden reducir significativamente sus emisiones.
- **Cumplimiento de objetivos climáticos:** La implementación efectiva de estas tecnologías ayudará a España a cumplir los objetivos climáticos bajo el Acuerdo de París y otras iniciativas internacionales. Esto no sólo beneficiará al medio ambiente, sino que también mejorará la reputación de España como país comprometido con la sostenibilidad.
- **Innovación en energías limpias:** El fomento de estas tecnologías impulsará la innovación en el sector de energías limpias, promoviendo el desarrollo de nuevas soluciones y aumentando la resiliencia energética del país.

RETOS

Barreras reguladoras:

- **Procesos de permisos largos y complejos:** La normativa actual implica procedimientos burocráticos extensos para obtener permisos necesarios para la construcción y operación de infraestructuras de captura y almacenamiento de CO₂, así como para la producción y distribución de hidrógeno. Esto retrasa significativamente los proyectos y aumenta los costes.
- **Necesidad de marco regulador claro:** Es esencial desarrollar un marco regulador claro y favorable que facilite la implementación de estas tecnologías. Esto incluye la creación de incentivos fiscales, subvenciones y políticas que promuevan la inversión en infraestructuras y tecnologías verdes.
- **Adaptación a normativas europeas:** Aunque se están implementando decretos europeos, es crucial que España adapte rápidamente la normativa para estar en línea con las directrices europeas y facilitar la cooperación internacional en proyectos de captura de carbono y producción de hidrógeno.

Insuficiencia de financiación:

- **Limitaciones de fondos públicos:** Aunque hay ayudas públicas, estas son insuficientes para cubrir las necesidades de inversión en infraestructuras y

tecnologías necesarias para la captura de carbono y la economía del hidrógeno. La comparación con países como Noruega, que ha invertido significativamente más, destaca esta disparidad.

- **Necesidad de financiación privada:** Se requiere un aumento en la participación del sector privado. Incentivos y políticas atractivas pueden fomentar la inversión privada, ayudando a cubrir el déficit de financiación.
- **Acceso a fondos europeos:** Aprovechar los fondos europeos de recuperación y otros mecanismos de financiación puede ser una solución viable. Es esencial que España desarrolle proyectos sólidos y competitivos que puedan atraer este tipo de financiación.

Desarrollo de infraestructuras:

- **Construcción de infraestructuras críticas:** Sin las infraestructuras necesarias, como redes de transporte de CO₂, plantas de almacenamiento y producción de hidrógeno, los proyectos de captura, uso y almacenamiento de carbono no pueden avanzar. La falta de estas infraestructuras, tanto a escala piloto como a escala industrial, limita la capacidad de implementar tecnologías CCUS a gran escala. En este sentido, el Centro de Descarbonización de Cataluña puede desempeñar un papel clave en la introducción de tecnologías emergentes en el mercado y en la validación de tecnologías maduras mediante plantas piloto que después se puedan escalar industrialmente.
- **Coordinación y planificación:** Es vital una planificación y coordinación eficaz entre los diferentes niveles de gobierno y el sector privado para desarrollar estas infraestructuras. Esto incluye la identificación de lugares adecuados para almacenamiento y la construcción de redes de distribución de hidrógeno y de CO₂.
- **Mantenimiento y actualización:** Las infraestructuras existentes también deben ser mantenidas y actualizadas para asegurar su eficiencia y longevidad. Esto implica inversiones continuas y un enfoque a la sostenibilidad.

Homogeneización normativa:

- **Armonización de normativas:** La armonización de normativas y estándares a escala europea y global es crucial para facilitar el comercio y la cooperación internacional al sector de captura de carbono y producción de hidrógeno. La falta de uniformidad reguladora puede crear barreras adicionales y aumentar los costes de cumplimiento.
- **Implementación de la Ley sobre la Industria de Cero Emisiones Netas:** Ley sobre la Industria de Cero Emisiones Netas (Net Zero Industry Act) de la Comisión Europea es un paso clave para establecer un mercado de gestión del carbono. Sin embargo, su implementación requiere esfuerzos concertados por parte de los estados miembros para informar sobre sus capacidades de almacenamiento de carbono antes de 2026 y para desarrollar marcos reguladores compatibles.

- **Colaboración internacional:** La colaboración internacional es esencial para establecer estándares comunes y compartir mejores prácticas. España puede beneficiarse al participar activamente en foros internacionales y en iniciativas de colaboración para armonizar las normativas y fomentar la innovación conjunta.

Así pues, Cataluña y España tienen una oportunidad única para participar activamente en la transición hacia una economía basada en la captura de carbono, el hidrógeno verde y sus derivados. Superar las barreras reguladoras, de financiación y de infraestructura es fundamental para aprovechar al máximo las oportunidades industriales y ambientales que ofrece esta transición. Con el compromiso adecuado, esta iniciativa puede posicionar a España y Cataluña como líderes en la lucha contra el cambio climático y en la innovación tecnológica sostenible.

La electrificación de todos los sectores posibles y el uso de energías alternativas, como el hidrógeno verde, los biocombustibles y la captura de CO₂, son prioridades esenciales.

Conclusiones y recomendaciones

1. **El CCUS es una palanca imprescindible en el *mix* de descarbonización, especialmente para los sectores de difícil abatimiento.** El análisis tecnológico, normativo y económico del documento muestra que la neutralidad climática no será viable sólo con eficiencia, electrificación y renovables. En industrias como el cemento, la cal, los fertilizantes, la siderurgia, la petroquímica o la valorización energética de residuos, la captura, uso y almacenamiento del CO₂ es a menudo la única vía realista para alcanzar reducciones profundas de emisiones.
2. **Las tecnologías CCUS han alcanzado un grado de madurez suficiente para un despliegue significativo esta década, pero todavía presentan retos importantes.** Hay ya decenas de plantas comerciales en el mundo, un número creciente de proyectos y una experiencia robusta en varios segmentos de la cadena de valor. Al mismo tiempo, el coste elevado, el consumo energético, la falta de infraestructura y la incertidumbre reguladora exigen políticas públicas activas y colaboración estrecha con el sector privado para superar el "valle de la muerte" a nivel tecnológico y financiero.
3. **La Unión Europea y España han puesto las bases normativas, pero hay que acelerar la implementación.** El Pacto Verde, la Ley Europea del Clima, el paquete "Fit for 55" y la Ley sobre la Industria de Cero Emisiones Netas (Net Zero Industry Act) proporcionan el marco general para el desarrollo del CCUS, incluyendo objetivos cuantitativos de almacenamiento y requisitos de información sobre capacidades geológicas. A nivel estatal, la transposición de la Directiva de almacenamiento geológico, el PNIEC y la Ley de Cambio Climático establecen instrumentos relevantes, pero aún es necesario concretar estrategias, procedimientos e incentivos específicos para la gestión del carbono.
4. **Cataluña puede y debe aprovechar una ventana de oportunidad para posicionarse como *hub* de CCUS en el sur de Europa.** La combinación de un fuerte tejido industrial emisor, un ecosistema científico y tecnológico avanzado, infraestructuras logísticas y energéticas consolidadas, el proyecto TarraCO₂ como almacén *offshore* y el proyecto del Centro de Descarbonización como infraestructura de prueba y demostración, configura un entorno único para impulsar proyectos integrados de captura, uso y almacenamiento a escala preindustrial e industrial.
5. **El Centro de Descarbonización y las plantas piloto móviles son instrumentos estratégicos para reducir riesgo, generar conocimiento y crear mercado.** Ensayando tecnologías de captura (absorción, adsorción, carbonatación) y de conversión del CO₂ en combustibles y productos químicos (RWGS–Fischer–

Tropsch) sobre fuentes reales de emisión, se podrá determinar qué soluciones son más adecuadas técnica y económicamente para cada sector, facilitando decisiones de inversión informadas y acelerando la curva de aprendizaje de la industria catalana.

6. **Es necesario un marco integrado de políticas públicas para desbloquear inversiones y asegurar una transición justa.** Las inversiones necesarias en CCUS son de gran magnitud y de largos plazos; por lo tanto, requieren estabilidad reguladora, instrumentos de mitigación de riesgo, mecanismos de financiación mixta y una coordinación estrecha entre administraciones, operadores de infraestructuras, industria, mundo académico y sociedad civil. Al mismo tiempo, la transición debe preservar la competitividad de las industrias expuestas a la competencia internacional y garantizar oportunidades de recualificación y empleo de calidad para la población.
7. **La planificación de la infraestructura de transporte y almacenaje es urgente y estratégica.** El desarrollo de ceoductos, terminales portuarias y almacenes geológicos —especialmente *offshore*— no puede quedar supeditado a decisiones fragmentadas proyecto a proyecto. Es necesario impulsar una planificación proactiva a escala de corredor (por ejemplo, mediterráneo), aprovechando sinergias con las redes de gas e hidrógeno, e integrándola en los instrumentos de planificación energética, territorial y de movilidad.
8. **El CCUS debe desplegarse con criterios de responsabilidad ambiental y social, evitando la dependencia de modelos altamente intensivos en carbono.** El papel del CCUS es reducir emisiones inevitables y descarbonizar usos difíciles, no perpetuar el uso indiscriminado de combustibles fósiles. Por ello, su desarrollo debe vincularse a hojas de ruta claras de transición energética, a objetivos crecientes de renovables y eficiencia, y a una gobernanza transparente que asegure la integridad ambiental y el beneficio social de los proyectos.

En síntesis, el mensaje de este Smart Vision Paper es claro: **si Cataluña y España quieren mantener una industria competitiva en un mundo climáticamente neutro, las tecnologías CCUS deben formar parte de su ADN productivo y de su estrategia.** La pregunta ya no es si hay que apostar por las CCUS, sino con qué velocidad, con qué ambición y con qué grado de coordinación institucional y empresarial habrá que hacer este despliegue.

Este SmartVision Paper#6: Captura, Uso y Almacenamiento del CO₂ ha sido elaborado por:
AEMES Smart

Dirección del Papel:

Agustí Chico, vocal de la Junta Directiva de AEMES Smart y director de Proyectos Singulares y Laboratorios Transversales de Eurecat

Con la colaboración destacada de:

Sara Rafecas y Ramon Manyà, socios de Rousaud Costas Durán, SLP (RCD)

Otros colaboradores:

Miriam Díaz de los Bernardos, directora de la UTTQ de Eurecat y directora de la Red H2CAT

Álvaro Reyes, promotor tecnológico de la UTTQ de Eurecat

Oliveras Viladoms, jefe de la unidad de descarbonización industrial del ICIQ

Núria Sadurní e Isabel Vizcarro, abogadas de RCD

Diseñado, impulsado y coordinado por:

Neus Olea y Marcel Martínez de AEMES Smart

Basado en las conclusiones y aportaciones realizadas en la Jornada Técnica AEMES-Smart

La captura y el almacenamiento del CO₂. Mercado, cadenas de valor y oportunidades

Celebrada el 24/01/2024

Con las intervenciones de:

Neus Olea, directora de **AEMES Smart**

Pere Condom, director del Área de Análisis Estratégico de la Dirección General de Industria de la **Generalidad de Cataluña**

Oriol Vilaseca, secretario de Descarbonización de **AEMES Smart** y CEO de **Vilaseca Consultores**

Josep Martin, director R&D de **Manufactura Moderna de Metales**

Frederic Clarens, director de la Unidad de Residuos, Energía e Impacto ambiental de **Eurecat**

Pedro Mora, presidente en **PTECO2**

Javier Uría Fernández, gerente de proyectos de Captura CO₂ para España de **Cemex España Operaciones S.L.U.** (representante de **Cemento Catalán**)

Con el apoyo del Área Metropolitana de Barcelona:



Con la colaboración de:

