

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Captura de CO₂: tecnologías para cumplir el Acuerdo de París

Una revisión del Estado del Arte realizada por la Plataforma Tecnológica Española del CO₂





Autor Principal: Luis Díaz Fernández (Plataforma Tecnológica Española del CO₂, PTECO2)

Otros autores: Fernando Rubiera González (CSIC-INCAR); Francisco García Labiano (CSIC-ICB);
Rosa M^a Alonso López (Plataforma Tecnológica Española del CO₂, PTECO2)

CAPTURA DE CO₂: TECNOLOGÍAS PARA CUMPLIR EL ACUERDO DE PARÍS

PALABRAS CLAVE

Captura CO₂; Acuerdo París, BECCS; combustibles renovables; biomasa; España; tecnologías CAUC; PTECO₂

RESUMEN

Dentro de los objetivos principales de la Plataforma Tecnológica Española del CO₂ (PTECO₂) destaca la realización, difusión y promoción de la investigación, desarrollo e innovación en tecnologías de captura, transporte, almacenamiento y usos y transformación del CO₂ (Tecnologías CAUC, CCUS por sus siglas en inglés). Es imposible alcanzar estos objetivos, en el ámbito de un entorno tan cambiante, sin actualizar la base de conocimiento en las materias comprendidas, y su difusión lo más amplia posible. Con esta intención, desde PTECO₂ desarrollamos las actualizaciones de nuestros monográficos, como el correspondiente a la captura del CO₂, “Captura de CO₂: tecnologías para cumplir el Acuerdo de París” (disponible en www.pteco2.es), con la visión de que, una vez superada la crisis financiera y con el horizonte de cumplir el Acuerdo de París, existen novedades suficientes que justifican dichas actualizaciones.

En una etapa donde las emisiones de CO₂ debidas a la producción energética con combustibles fósiles parecen en proceso de desaparición irreversible, se debe incidir en las tecnologías que apunten hacia las emisiones de otras industrias, como el cemento, la siderurgia y la industria química, con sus particularidades.

El enorme crecimiento que los usos del CO₂ han venido mostrando en los últimos años también supone una importante diferencia en cuanto a los procesos de captura. Ya no se trata de una visión en la que simplemente se captura el dióxido de carbono, sino que se realiza para darle un uso a este gas, con lo que esto supone.

La reedición de este monográfico, cuyos resultados principales se recogen en esta comunicación realizada en exclusiva para “CONAMA 2020”, viene derivada de los importantes cambios sufridos tanto a escala nacional como internacional en el contexto de la CAUC desde la edición del anterior monográfico en 2014. Desde el punto de vista nacional, a pesar de los avances realizados en los procesos de precombustión y oxidación, actualmente los mayores referentes en las tecnologías CAUC en España han sido desmantelados (ELCOGAS) o se encuentran en una etapa de transición sin un futuro definido (instalaciones de la Fundación CIUDEN). Desde el punto de vista internacional, la firma y posterior ratificación del Acuerdo de París en 2015 ha abierto nuevas perspectivas a los procesos CAUC, que se consideran necesarios e indispensables para cumplir los objetivos marcados por dicho Acuerdo.

INTRODUCCIÓN

La “captura” de CO₂ constituye la primera etapa del conjunto de tecnologías que tienen por finalidad el evitar las emisiones de grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera y que se han dado en llamar Captura, transporte, Almacenamiento y Uso de Carbono (CAUC) (CCUS de sus siglas en inglés, *Carbon Capture, Use and Storage*).

Debido a las cantidades de CO₂ que se liberan actualmente en la atmósfera, más de 35.000 millones de toneladas al año (International Energy Agency [IEA], 2017), **para que la aplicación de las tecnologías CAUC sea efectiva debe realizarse en emplazamientos que permitan el almacenamiento de millones de toneladas.** De ahí que el primer paso de la cadena tenga sentido realizarlo principalmente en grandes focos de emisión de CO₂, donde el objetivo de la captura es obtener una corriente concentrada de CO₂ para su posterior compresión, transporte y almacenamiento permanente en una formación geológica profunda.

Para los focos de emisión difusos como el transporte, o domésticos, son más efectivas las medidas dirigidas al uso local de combustibles renovables, mejoras de la eficacia final, o utilización de vectores energéticos con posibilidad de emisiones mínimas de CO₂ en su ciclo de vida como los biocombustibles, el H₂, o la electricidad.

Las grandes centrales térmicas, cementeras, refinerías, acerías, cerámicas, etc., son procesos industriales diseñados para obtener uno o varios productos energéticos o químicos a gran escala. Estos sistemas son grandes fuentes estacionarias de CO₂ porque hacen un uso masivo de combustibles fósiles para alimentarse de la energía y las materias primas necesarias para el proceso. El desafío para cualquier tecnología de captura es transformar estos procesos existentes (o "sistemas de referencia") en otros que generen el mismo producto pero con una corriente de CO₂ separada y comprimida para su confinamiento ("sistema con captura"). Por tanto, un sistema con captura de CO₂ se define en este documento como el proceso completo necesario para producir el mismo producto que los sistemas actuales pero generando una corriente concentrada de CO₂ susceptible de compresión, transporte y uso o almacenamiento geológico permanente.

Grandes industrias emisoras de CO₂ en todo el mundo han aplicado tecnologías de captura desde hace décadas. El CO₂ “capturado” se usa, por ejemplo, en la industria alimentaria, en la fabricación de fertilizantes, o en la recuperación mejorada de petróleo o gas natural.

Por definición, todos los sistemas de captura de CO₂ incluyen siempre un proceso de separación de gases a gran escala integrado en el proceso necesario para seguir generando el mismo producto que el sistema de referencia. Esta separación de gases no es necesariamente sólo una separación de CO₂. De hecho, los sistemas de captura de CO₂ se suelen clasificar en función del lugar donde se sitúa la gran etapa de separación de gases en el sistema y del tipo de gas que se separa en los mismos. La Figura 1 esquematiza los sistemas de captura según este criterio, para el caso de grandes centrales térmicas o plantas que utilizan el combustible fósil para generar energía en una u otra forma (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2005). Otros sistemas de captura para otros procesos distintos a los de generación de energía suelen poder adaptarse a esta clasificación (post-combustión, precombustión, oxicomustión), pero se han incluido por simplicidad en el cajón de "procesos industriales".

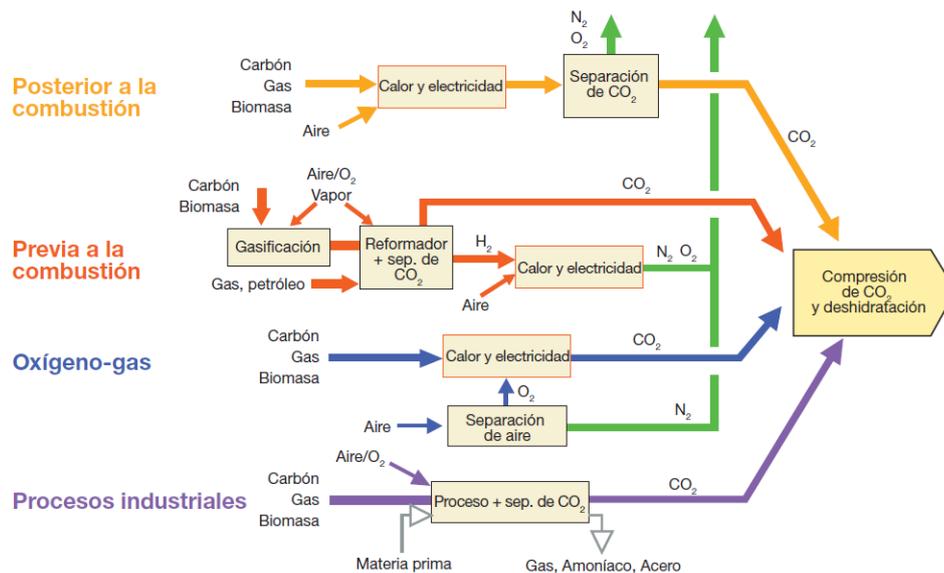


Figura 1. Los sistemas de captura de CO₂. (IPCC, 2005)

La Plataforma Tecnológica Española del CO₂ (PTECO2) ha adoptado la siguiente **clasificación para describir los distintos sistemas con captura de CO₂**, que en síntesis consisten en:

- **Post-combustión:** el objetivo es separar el CO₂ que se encuentra diluido en el resto de componentes de un gas de combustión, obtenido al quemar con aire un combustible fósil o cualquier otro basado en carbono. La infraestructura energética mundial se basa en procesos mayoritariamente de combustión con aire (centrales térmicas, cementeras, refinerías, cerámicas, etc.), para los que irían dirigidos los procesos de captura por post-combustión. Su problemática principal es la dilución del CO₂ en la corriente efluente de la combustión, con un flujo elevado y prácticamente a presión atmosférica.
- **Pre-combustión:** el combustible se transforma en una mezcla gaseosa de Hidrógeno y CO₂. El H₂ es separado y puede ser utilizado como combustible sin producir emisiones de CO₂. Los pasos de conversión del combustible requeridos son más complejos que los procesos necesarios en post-combustión, por lo que no es la tecnología más adecuada para aplicar a la mayoría de las plantas de generación eléctrica ya existentes. Sin embargo, es la tecnología que la industria química utiliza desde hace décadas para producir H₂, CO₂, NH₃, u otros procesos que requieren la separación del CO₂, a partir de combustibles fósiles, existiendo plantas a escalas de potencia similares a las requeridas en la producción de electricidad.
- **Oxicombustión:** consiste en la combustión del combustible en presencia de oxígeno puro en lugar de aire, lo que incrementa la concentración de CO₂ en el gas efluente y facilita su separación final antes del almacenamiento respecto al sistema de "post-combustión". Su principal problemática es el incremento de la inversión para producir el oxígeno puro y el desarrollo de equipos adaptados a la combustión con oxígeno puro en grandes instalaciones.

En el monográfico “Captura de CO₂: tecnologías para cumplir el Acuerdo de París” (PTECO₂, 2019) se incluye un capítulo específico para explicar las características y particularidades de cada uno de estos sistemas. Asimismo, se dedica un capítulo a los aspectos más relevantes de la captura en los llamados procesos industriales, incluyendo el procesado de gas natural, la industria del cemento, refinerías y siderurgia.

Actualmente, la principal barrera para el despliegue de las tecnologías CAUC no es tecnológica, sino el sobrecoste que representa su incorporación en los procesos productivos energéticos o industriales. Sin embargo, es posible que durante los próximos años este sobrecoste se vea compensado con el precio que deban de pagar las grandes centrales o industrias por la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂.

Además de los diversos costes asociados a la cadena de captura, transporte y almacenamiento; en todos los estudios se destaca, como el mayor, el derivado del proceso de captura. Por ello, en el monográfico se ha incluido un capítulo específico sobre costes asociados a la captura en el que se ha pretendido realizar un resumen de los estudios considerados más relevantes. Si bien estos son muy numerosos, y al tener que basarse en hipótesis no contrastadas con plantas reales, los cálculos han ido evolucionando en los últimos años y pueden ser dispares, al tener que comparar tecnologías que cuentan con amplio despliegue a las escalas requeridas, con otras menos desarrolladas o aplicadas a menor escala en otras industrias.

Finalmente, en el monográfico “Captura de CO₂: tecnologías para cumplir el Acuerdo de París” se ha pretendido dar una orientación desde una perspectiva nacional. Por ello se incluyen capítulos específicos dedicados a describir las capacidades existentes en España relacionadas con la captura de CO₂ y los principales proyectos en los que se ha trabajado o se está trabajando. A ello, hay que añadir un análisis de Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades, entre las que se destaca la fortaleza y oportunidad que representa el esfuerzo realizado en España en el despliegue de plantas piloto de escala singular, básicas para el desarrollo de futuras plantas y un amplio conocimiento de las tecnologías. Basándose en todo lo anterior se recogen en un capítulo las recomendaciones estructuradas o Plan de Acción, que deberían ser consideradas en los planes nacionales de Investigación Desarrollo e Innovación.

DISCUSIÓN

Contexto internacional

Tras el Acuerdo de París, alcanzado en la pasada reunión de la Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, 2015), se plantea evitar que el incremento de la temperatura media global de la Tierra supere los 2 °C (escenario 2DS) con respecto a los niveles preindustriales y promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1,5 °C (escenario B2DS). Según dicho Acuerdo, cada país debe fijar sus Contribuciones Nacionales (INDC) a la reducción de emisiones, las cuales podrán ser revisadas cada 5 años. Sin embargo, la UE ya se ha comprometido a alcanzar en 2030 una reducción del 40% respecto a los niveles de 1990.

Actualmente, se están emitiendo alrededor de 40 Gt CO₂ al año a la atmósfera. Para alcanzar el objetivo propuesto en el Acuerdo de París los modelos climáticos sugieren una reducción entre el 40 y el 70% de las emisiones globales de CO₂ en 2050, alcanzar emisiones cero en 2070 y emisiones negativas a final de siglo (European Academies – Science Advisory Council [EASAC], 2018). Esto supone dejar de emitir a la atmósfera alrededor de 800 Gt C hasta 2070. Obviamente, esta reducción de emisiones no puede alcanzarse mediante una única tecnología, siendo necesaria la utilización y mejor integración de varias de ellas, entre las que se incluye el uso de la energía nuclear, las energías de origen renovable, el cambio a combustibles con menor intensidad de carbono, el aumento de la eficacia en los puntos de producción y en el de uso final, etc., (IEA, 2012a). Sin embargo, incluso así no se alcanzarían los niveles de reducción necesarios para cumplir los objetivos del Acuerdo de París, por lo que diversas organizaciones internacionales del clima y de la energía, destacan la importancia de desarrollar las tecnologías de Captura, Transporte, Almacenamiento y Uso de Carbono (CAUC) como medio de transición hacia un nuevo modelo energético descarbonizado.

En la Figura 2 se observa que las tecnologías CAUC pueden contribuir hasta un 14% a la reducción de emisiones necesaria para el periodo 2020-2060 en el escenario 2DS, y hasta en un 32% en el escenario B2DS. Estos porcentajes equivalen a la captura y almacenamiento de aproximadamente 100-200 Gt CO₂ durante los próximos 40 años.

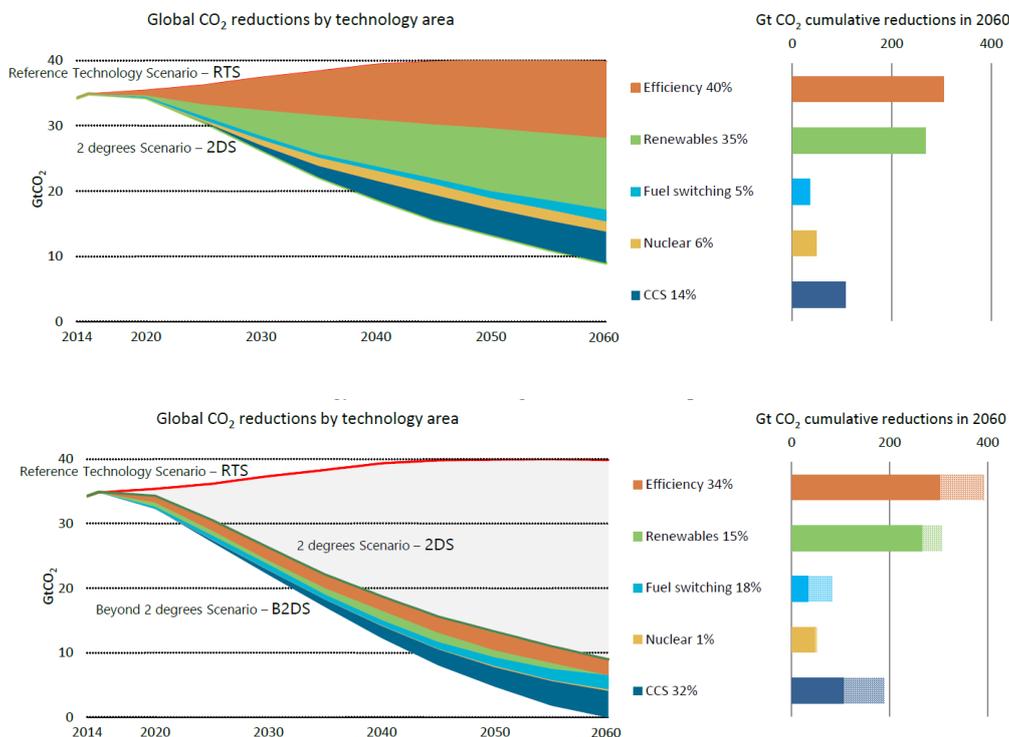


Figura 2. Contribución de las diferentes tecnologías al cumplimiento del Acuerdo de París. (IEA, 2017).

Por tanto, para que la aplicación de las tecnologías CAUC sea efectiva debe realizarse en emplazamientos que permitan el almacenamiento de millones de toneladas. Del mismo modo,

teniendo en cuenta que la captura es la primera etapa dentro del proceso CAUC, ésta debe realizarse principalmente en grandes focos de emisión de CO₂, como pueden ser las grandes centrales eléctricas y diferentes procesos industriales. En el caso de los procesos industriales, el uso de tecnologías CAUC puede suponer la única posibilidad de reducción de emisiones a gran escala en algunos sectores (cementeras, producción de acero, refinerías) (IEA, 2013). Se prevé que el 45% del CO₂ capturado en el periodo 2015-2050 provenga de aplicaciones industriales. Además, la utilización de recursos energéticos de carácter renovable (biogás, biomasa, residuos orgánicos, etc.), junto con la captura y almacenamiento del CO₂ producido, conocido en inglés como BECCS (*Bio-Energy and Carbon Capture and Storage*), se plantea como la única opción posible capaz de obtener energía y emisiones negativas de CO₂ al mismo tiempo (EASAC, 2018).

Por otro lado, de los diversos costes asociados de la CAUC, en todos los estudios se destaca que la etapa de captura representa el mayor porcentaje, con un 75% del total, correspondiendo un 15% al transporte y un 10% al almacenamiento. Por tanto, la investigación y desarrollo de tecnologías de captura de CO₂ que abaraten dicho coste resulta primordial para el desarrollo de las tecnologías CAUC.

Estado del arte de la CAUC a nivel mundial

Durante los últimos años se ha producido un gran avance a nivel mundial en el desarrollo y aplicación de las tecnologías CAUC, especialmente en la presencia de plantas con elevada capacidad de captura de CO₂ y su posterior almacenamiento. El Global Carbon Capture and Storage Institute (GCCSI)¹ y el Massachusetts Institute of Technology (MIT)² llevan varios años realizando una monitorización de proyectos integrados de gran escala (LSIP, *Large Scale Integrated Project*), entendiéndose como tales aquellos de una escala representativa de procesos comerciales, con capacidades de captura de varios cientos de miles de toneladas de CO₂ que se almacenan o se aprovechan (al menos 0,4 millones de toneladas por año (Mtpa) de CO₂ para procesos industriales y 0,8 Mtpa para centrales térmicas de carbón).

Según las bases de datos del Global CCS Institute y el MIT, a fecha de junio de 2019, existían 18 grandes proyectos de CAUC en operación en el mundo con una capacidad de captura de 33,3 Mtpa CO₂.

La mayoría de ellos corresponden a procesos de procesamiento de gas natural, que incluyen sistemas de separación industrial, y dos de ellos utilizan sistemas de post-combustión en centrales térmicas de carbón (Boundary Dam y Petra Nova).

Asimismo, se espera que 5 proyectos más entren en operación antes de 2021, alcanzando una capacidad de captura de CO₂ de unos 40,1 Mtpa. El más próximo a su comienzo es un proyecto de almacenamiento en Australia como parte del proyecto Gorgon para procesamiento de gas natural. Existen dos proyectos más en China (Sinopec Qilu Petroquímica CCS y Yanchang Integrated CCS and Demonstration) en procesos de producción de productos químicos. El resto se desarrollarán en Canadá. Concretamente, en el proyecto Alberta Carbon Trunk Line (ACTL) se

¹ Global Carbon Capture and Storage Institute (<https://www.globalccsinstitute.com>)

² Carbon Capture and Sequestration Project Database (<https://sequestration.mit.edu>)

pretende capturar el CO₂ procedente de una refinería y de una planta de producción de fertilizantes con el objetivo de utilizar el CO₂ en procesos EOR (*Enhanced Oil Recovery*) de recuperación mejorada de petróleo.

A más largo plazo existen 4 proyectos en etapas avanzadas de desarrollo (capacidad de captura 15 Mtpa): CarbonNet en Australia, Port of Rotterdam CCUS en Holanda, Norway Full Chain CCS en Noruega y Lake Charles Methanol en Estados Unidos. Los tres primeros pretenden crear una red de captura de CO₂ a la que puedan conectarse varias industrias generadoras de emisiones de CO₂ en sus procesos. El último capturará el CO₂ generado en la producción de metanol a partir de la gasificación de coque de petróleo.

Finalmente, 16 proyectos a gran escala se encuentran en las primeras etapas de desarrollo (28,3 Mtpa), 6 de ellos en China, en procesos de generación de energía y producción de productos químicos, 5 en el Reino Unido para producción de hidrógeno y generación de electricidad, así como en refinerías. En el resto de Europa se plantean un proyecto en Irlanda, para el establecimiento de una red de captura que recoja el CO₂ producido en una central de ciclo combinado con turbina de gas y de una refinería, y otro proyecto en Holanda, con la captura del CO₂ generado en la producción de hidrógeno a partir de metano. Adicionalmente, hay planificados dos proyectos más en Corea (Korea CCS-1 y Korea CCS-2) y otro en Australia (South West Hub).

De acuerdo con la hoja de ruta trazada por la Agencia Internacional de la Energía ([IEA, 2013](#)), los **objetivos en el desarrollo de las tecnologías CAUC en los próximos años** deberían corresponderse con:

- 2020: Existen al menos 30 proyectos de demostración a nivel mundial y en distintos sectores de actividad. La capacidad de captura y almacenamiento se sitúa en 50 Mtpa CO₂.
- 2030: Las tecnologías CAUC han sido demostradas con éxito en el sector de producción de energía y gran parte de los sectores industriales. La capacidad de captura y almacenamiento se sitúa en 2000 Mtpa CO₂.
- 2050: Las tecnologías CAUC se usan de manera común para la reducción de emisiones. La capacidad de captura y almacenamiento se sitúa en 7000 Mtpa CO₂.

La captura de CO₂ en pre-combustión

La producción de un gas de síntesis a partir de combustibles fósiles (ya sean estos sólidos, líquidos o gaseosos) vía gasificación o reformado son procesos conocidos desde hace décadas y ampliamente extendidos en todas las partes del mundo. La capacidad acumulada de producción de gas de síntesis a nivel mundial en 2017 era de 173.000 MW_t, con otros 108.000 MW_t adicionales en construcción, que se prevé que entren en operación en 2020, y otros tantos en planificación ([Higman, 2017](#)). La región del mundo con más capacidad acumulada es Asia (principalmente China), y también es donde se encuentran la mayoría de proyectos en construcción y planificados. Las aplicaciones del gas de síntesis producido en estas plantas son variadas, desde producción de amoníaco y fertilizantes, hidrógeno, combustibles líquidos,

metanol, y más recientemente metano (SNG, gas natural sintético). En muchas de estas plantas se utilizan también las tecnologías presentadas para las diferentes etapas de captura de CO₂ en pre-combustión, conversión de CO a CO₂ y separación de CO₂ e H₂, ya que son las requeridas para las diferentes aplicaciones mencionadas. En estas plantas, a no ser que el CO₂ tenga algún valor añadido lo habitual es que se libere directamente a la atmósfera.

En cuanto a proyectos que aparte de captura también integren transporte y almacenamiento, el GCCSI (Global CCS Institute) lleva varios años realizando una monitorización de proyectos integrados de gran escala (LSIP, *Large Scale Integrated Project*), entendiendo como tales aquellos de una escala representativa de procesos comerciales con capacidades de captura de varios cientos de miles de toneladas de CO₂ que se almacenan o se aprovechan.

A fecha junio de 2019, se identifican 18 proyectos de estas características activos en el mundo, de los cuales 10 utilizan tecnologías de pre-combustión lo que demuestra el elevado grado de madurez de la tecnología.

Por otro lado, en 2014 había en operación 7 plantas GICC comerciales que usaban carbón como combustible, y había 3 más en construcción. Una de estas últimas, Kemper County IGCC Project, en Estados Unidos, habría de ser la primera en el mundo en incorporar captura de CO₂ en pre-combustión con utilización posterior del CO₂ en EOR (*Enhanced Oil Recovery*, recuperación mejorada de petróleo). Su puesta en servicio estaba prevista para el año 2014, pero los sucesivos retrasos e incrementos de capital necesarios acabaron por la resolución del Departamento de Energía estadounidense de traspasar la actividad a gas natural.

Otras iniciativas de captura de CO₂ pre-combustión a nivel de demostración se resumen a continuación:

- En **España** se puso en funcionamiento la primera planta piloto de captura de CO₂ y producción de H₂ que se integró en la Planta GICC de ELCOGAS en Puertollano. Esta planta piloto fue el resultado del proyecto nacional PSE-CO₂, y se puso en servicio en 2010. Utilizaba tecnologías convencionales mencionadas a lo largo del presente capítulo: gasificación de carbón y residuo de petróleo, *Water-Gas-Shift*, absorción química, y PSA. La producción era de 100 t/d de CO₂ y 2 t/d de H₂ de 99,99% de pureza. La central cesó su actividad en enero de 2016, culminando el proceso de desmantelamiento con el derribo de la torre de gasificación en septiembre de 2018. Se ha alcanzado un acuerdo con ENCE Energía y Celulosa para la compra de esta planta y su integración en una planta de generación de energía a partir de biomasa de 50 MW cuya operación está prevista comenzar en el segundo semestre de 2019.
- En **Holanda**, la empresa NUON (adquirida por Vattenfall) instaló en su central GICC sita en Buggenum (Holanda) una planta piloto capaz de capturar unos 35 t/d de CO₂. Tras una intensa batería de pruebas de caracterización, la instalación se encuentra fuera de servicio al haberse clausurado en 2013 la central de GICC.
- En **Japón**, J-POWER construyó dos plantas piloto de captura de CO₂ integradas en su proyecto EAGLE (gasificación de diseño propio). Una de las plantas se centra en la captura en condiciones dulces (WGS dulce y absorción química), y la otra orientada a la

captura en condiciones ácidas (WGS ácido y absorción física). Las dos plantas pueden operar en paralelo y se encuentran operativas, en periodo de pruebas hasta 2020-2021.

- En **Alemania**, en el marco del Proyecto METPORE II financiado por el Ministerio Federal para Asuntos Económicos y de la Energía, se ha operado una planta piloto en una corriente secundaria de una planta de carbón en Rheinhafen-Dampfkraftwerk RDK-7 de la empresa EnBW Energie Baden-Württemberg AG, con membranas Polyactive® desarrolladas por el centro de investigación GKSS, estudiando la influencia de la pérdida de presión en distintos tipos de módulos de membrana. Es uno de los primeros estudios que validan experimentalmente en planta piloto los modelos de captura de CO₂ con tecnología de membranas (Pohlmann et al., 2016).

La captura de CO₂ en post-combustión

La mayor parte de las fuentes antropogénicas estacionarias de emisiones de CO₂ se localizan actualmente en instalaciones de combustión asociadas a grandes centrales térmicas, cementeras, refinerías, plantas siderometalúrgicas, etc. Se trata, en general, de procesos a gran escala para obtener diferentes vectores energéticos (electricidad, calor, combustibles de automoción) o productos comerciales (acero, cemento, fertilizantes, plásticos, etc.), que emiten como subproducto de la combustión grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Más del 99% de dicho CO₂ se emite hoy por las chimeneas de los centros industriales en forma de corrientes de gases de combustión. El CO₂ de estas corrientes se encuentra muy diluido con concentraciones que oscilan entre el 4% y el 20% en volumen, como consecuencia de la presencia de nitrógeno (el componente mayoritario del aire, que no participa en la combustión), vapor de agua, oxígeno no utilizado en la combustión y otros compuestos minoritarios.

La vida de los grandes equipos de combustión es de varias décadas (hasta 40-50 años). Por tanto, la transformación del sistema energético actual (sobre todo del más moderno) en un sistema con emisiones reducidas gracias a la captura y almacenamiento de CO₂, requiere de sistemas de captura de CO₂ después de la combustión o de profundas transformaciones de los equipos para adaptarlos a tecnologías de oxcombustión o de pre-combustión.

Los principales sistemas de captura de CO₂ después de la combustión están compuestos por bloques tecnológicos muy maduros y, en algunos casos, usados durante décadas en la industria energética, química, de petróleo y de gases industriales. Estos bloques o paquetes tecnológicos están en continua mejora y optimización a través de investigación y desarrollo en los países y en el entorno investigador de empresas líderes en cada uno de ellos. Los procesos emergentes de captura de CO₂ pretenden salvar las limitaciones de los procesos existentes cuando estos son aplicados a sistemas de captura a gran escala (como centrales térmicas).

Los sistemas completos de captura de CO₂ en post-combustión se basan siempre en una gran etapa de separación de CO₂ de los gases de combustión generados en la fuente emisora de CO₂. Esta etapa de separación puede requerir diversas operaciones adicionales (por ejemplo, de purificación del gas, de aporte o recuperación de calor, de recompresión de gases, etc.), en el

proceso de referencia sin captura. Se suelen considerar también como parte del sistema completo de captura, las etapas necesarias de compresión y purificación del CO₂ separado de los gases de combustión.

En general, existe consenso en que los sistemas de post-combustión por vía húmeda son una opción realista y muy preparada para la demostración a gran escala en centrales térmicas si existiesen los incentivos necesarios para el despliegue CAUC. Es una opción demostrada a escala industrial desde hace décadas (existen cientos de plantas en todo el mundo de absorción con MEA a escalas de decenas de MW_t equivalentes (IPCC, 2005)).

Los principales procesos o **tecnologías emergentes de captura de CO₂ en post-combustión**, que pretenden competir (con menores costes unitarios por tonelada de CO₂ evitada y menor impacto energético y ambiental) con las tecnologías más desarrolladas son, principalmente, los siguientes:

- Procesos avanzados de absorción
- Procesos de carbonatación-calcinación (*Calcium Looping*)
- Procesos con membranas
- Procesos de adsorción

La captura de CO₂ en oxidación

El proceso de oxidación se basa en el principio básico del uso como comburente de la combustión de oxígeno en lugar de aire, aumentando así el contenido de CO₂ en los gases de salida del proceso, facilitando su purificación y compresión para su transporte y posterior uso o almacenamiento.

El grado de oxidación se puede definir según los estados intermedios de combustión que pueden obtenerse usando aire enriquecido en O₂ en diferentes porcentajes. El intervalo se mide a partir de la cantidad de O₂ de la combustión convencional, o combustión con aire, y combustión con O₂ puro.

La reducción o ausencia de N₂ en el comburente implica un elevado contenido de CO₂ en los gases de combustión, pudiéndose alcanzar valores cercanos al 95% en base seca (en función de diversos factores, como las impurezas o las infiltraciones), lo cual facilita el posterior tratamiento para su adecuación al transporte.

La experiencia española en oxidación de mayor tamaño es la llevada a cabo por la Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN) en su Planta de Captura de CO₂, integrada en el Centro de Desarrollo de Tecnologías de Captura de CO₂, que también incluía una Planta experimental de Transporte. Dicha planta constaba de todas las etapas necesarias en el proceso, desde la recepción y preparación de combustibles hasta su posterior captura y adecuación para el transporte, mediante dos tecnologías de caldera diferentes, Carbón Pulverizado y Lecho Fluido Circulante, ambas con la posibilidad de trabajar en modo convencional con aire o en diferentes grados de oxidación.

El proyecto de oxidación de CIUDEN incluía, además, una planta de almacenamiento geológico en acuífero salino con una capacidad de almacenamiento de cerca de 2 millones de toneladas. Asimismo, mediante la colaboración de ENDESA, Foster Wheeler y CIUDEN, se planteó el desarrollo de un proyecto financiado por el programa europeo EEPR para la construcción y explotación de una planta de 320 MWe, basada en la tecnología de oxidación con Lecho Fluido Circulante, transporte mediante ceoducto y almacenamiento en acuífero salino profundo. Finalmente, el proyecto no fue desarrollado.

Al igual que España, otros países han avanzado en el desarrollo de esta tecnología mediante proyectos y plantas de demostración. A modo de resumen, se muestran las principales **experiencias internacionales**:

- Schwarze Pumpe (Alemania, 30 MW_e), caldera de carbón pulverizado con generación eléctrica y sin almacenamiento anexo del CO₂.
- Lacq (Francia, 35 MW_t), caldera de gas natural y almacenamiento de CO₂ en yacimientos agotados de gas.
- Yingcheng (China, 35 MW_t), caldera de carbón pulverizado con producción de electricidad y calor útil (reconversión de una instalación anterior), sin almacenamiento de CO₂.
- Callide (Australia, 30 MW_e), caldera de carbón pulverizado con producción de electricidad y almacenamiento de CO₂ en yacimientos agotados de gas.

Algunas iniciativas a una escala ya comercial han sido canceladas, como White Rose (Reino Unido) y Future Gen (Estados Unidos). En China se está realizando el estudio de viabilidad de conversión a oxidación de las centrales de Daqing y Shanxi, con uso del CO₂ para extracción mejorada de petróleo, EOR.

A fin de evitar los costes de una planta de fraccionamiento de aire (ASU) para producir el oxígeno necesario para la oxidación, en la década de los 90 se empezó a desarrollar el concepto teórico de un nuevo proceso de combustión capaz de alcanzar eficacias de captura de CO₂ del 100% sin apenas penalización energética (Adánez et al., 2012).

El concepto de combustión con transporte de oxígeno, denominado en inglés "Chemical Looping Combustion" (CLC), está basado en la transferencia de oxígeno del aire al combustible por medio de un transportador de oxígeno, normalmente en forma de óxido metálico, por lo que el N₂ del aire no se mezcla nunca con el combustible.

La tecnología de **Chemical Looping** tiene amplias posibilidades de desarrollo en diferentes líneas de investigación y aplicaciones de tipo energético e industrial:

- En la industria del gas y del petróleo para reemplazar los sistemas convencionales de captura de CO₂. En la industria del petróleo se podrían utilizar diferentes combustibles líquidos, como hidrocarburos pesados, para la producción de calor y vapor de proceso. También tiene un amplio potencial de desarrollo en el proceso de generación de vapor para diferentes aplicaciones, como por ejemplo en la extracción de pizarras bituminosas.

- La industria de la bioenergía (biogás, biomasa, etc.), presenta también un gran potencial en un mercado de emisiones de CO₂ teniendo en cuenta que su utilización en procesos CAUC permite alcanzar emisiones negativas de CO₂.
- Asimismo, la posibilidad de obtener combustibles líquidos para transporte terrestre o aviación procedente de gas de síntesis obtenido mediante procesos de gasificación, CLG (*Chemical Looping Gasification*), a partir de biomasa es una de las principales vías de desarrollo actual.
- En el uso de carbón para la generación de energía eléctrica en centrales convencionales mediante la utilización de materiales de bajo coste como minerales naturales o residuos.

Para el futuro desarrollo de la tecnología es necesario la demostración a mayor escala, así como el desarrollo de materiales con mayor vida media y el menor coste posible. En este sentido se está empezando a descartar el uso de materiales basados en Ni, en favor de materiales basados en Cu, Fe y Mn. Asimismo, si se desean obtener elevadas eficacias de producción eléctrica, que sean competitivas con otras tecnologías de captura de CO₂, es necesario el desarrollo de la tecnología CLC a presión.

La mayor parte de la **investigación en España para el desarrollo de procesos CLC** se ha realizado en el Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC) de Zaragoza. El ICB-CSIC empezó la investigación en procesos CLC en el año 2000 y desde entonces ha participado en la mayoría de los principales proyectos europeos que han permitido el amplio desarrollo de esta tecnología en los últimos años: GRACE, CCCC, CLCGasPower, CACHET, ECLAIR, INNOCUOUS, ACCLAIM, SUCCESS y CLARA.

En el ICB-CSIC se han diseñado, construido y operado varias plantas CLC de tamaño comprendido entre 500 W_t y 50 kW_t, para el uso de combustibles gaseosos, líquidos y sólidos. Ello ha permitido desarrollar y probar el comportamiento de diferentes transportadores de oxígeno y combustibles durante su operación en continuo.

La economía de la CAUC en el proceso de reducción de emisiones de CO₂

La puesta en marcha de los procesos de captura, transporte y almacenamiento de CO₂ en los sectores energético e industrial conlleva unos costes de inversión y operación, que se traducirán en un aumento del precio final de la energía y de los productos industriales.

En la situación actual de desarrollo existen muchas incertidumbres respecto a la estimación de los costes actuales y futuros de la CAUC. Muchos de los componentes individuales de la cadena captura-transporte-almacenamiento se aplican con éxito y garantías de rentabilidad en un buen número de procesos industriales y forman parte, por tanto, de mercados maduros. No obstante, **la tecnología en su conjunto, con todos los elementos integrados está aún en el comienzo de su curva de aprendizaje, con un enorme potencial para abaratar costes**, principalmente a partir de la introducción de mejoras tecnológicas y de sacar beneficio a la economía de escala.

En el camino que aún le queda a estas tecnologías para alcanzar la etapa comercial, resulta imprescindible trabajar en la línea de reducción de costes y en la mejora de eficacia e integración energética.

El aumento de escala que significa la aplicación de los componentes individuales de la CAUC a los enormes caudales de gases de centrales térmicas o grandes centros de producción industrial y la inexistencia de plantas de demostración en las que se disponga de todos los componentes de forma conjunta, hacen que existan incertidumbres importantes para cerrar análisis económicos completamente fiables.

Por otra parte, el avance del grado de desarrollo de aquellas tecnologías que hoy en día están en el comienzo de su cadena de maduración conducirá a que la segunda y tercera generación de tecnologías CAUC se podrán ir incorporando al mercado con unos costes cada vez más reducidos.

La inclusión de la CAUC dentro de las prioridades de la UE en los Programas Marco y en el Horizonte 2020 puede representar para Europa una posición ventajosa con relación al papel que puede jugar en la curva de aprendizaje de estas tecnologías, y así mantener a Europa en una posición relevante en el panorama mundial.

En la cadena completa de la CAUC, los procesos de captura y compresión se muestran como los más costosos, consumiéndose en esta parte aproximadamente las tres cuartas partes de los costes totales. Los costes totales no sólo dependerán del sistema de captura utilizado, del tipo de almacenamiento o de la distancia de transporte, sino también de otras variables como el diseño, la operación, la financiación, el tamaño y la localización de la planta, el tipo de combustible utilizado, así como los costes derivados del consumo de combustible, electricidad y auxiliares.

Cuando se planifica la construcción de una nueva planta de producción energética o industrial, el cálculo de los costes que implica el establecimiento de los sistemas de captura y almacenamiento de CO₂ puede condicionar el tipo de planta seleccionada. Por ejemplo, para una central térmica convencional o un ciclo combinado de gas natural resultará más sencilla la aplicación de un sistema de captura en post-combustión.

Sin embargo, **los costes adicionales serán inferiores cuando la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂ se integre** dentro de nuevas tecnologías para la producción de energía como la gasificación integrada en ciclo combinado (GICC) o las instalaciones para la producción de hidrógeno (en la pre-combustión) o, en el caso de una instalación industrial, procesos de producción modificados para optimizar la integración de la CAUC. Aunque la mayoría de las instalaciones existentes podrían ser modernizadas para integrar los sistemas de CAUC desde su estado actual, resultaría siempre más caro, frente a nuevas plantas que ya incorporen dichos sistemas.

Entre los **estudios de análisis de costes publicados** en los últimos años destacan los realizados por el DOE americano (**Department of Energy [DOE], 2010**), la Plataforma Europea de emisiones cero (**ZEP, 2011**), el Consejo Asesor de Academias de Ciencias Europeas (**EASAC, 2013**), el Global CCS Institute (GCCSI, 2011, 2017), Pöyry Management Consulting (**2015**), y Rubin et al. (**2015**).

De acuerdo con el estudio de la ZEP, el desglose de costes en la cadena completa de la CAUC en su etapa comercial para su aplicación a centrales termoeléctricas de carbón o gas natural se distribuiría de acuerdo con las cifras que se presentan en el Cuadro 1, donde la variabilidad de las distancias desde el centro de producción al de almacenamiento, las condiciones del terreno y las características del almacenamiento geológico condicionarían una horquilla de costes bastante amplia para las etapas de transporte y almacenamiento.

Cuadro 1. Distribución de costes del CO₂ evitado para la captura, el transporte y el almacenamiento en centrales termoeléctricas

	Central térmica de carbón (€/t CO ₂)	Central térmica de gas natural (€/t CO ₂)
Captura	30-35	66-90
Transporte	2-16	2-16
Almacenamiento	1-20	1-20
TOTAL	33-71	69-126

Fuente: ZEP, 2011

El reto de la CAUC en el Acuerdo de París

El Acuerdo de París alcanzado en diciembre de 2015 marca la pauta a seguir en la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera a partir de 2020, cuando el actual Protocolo de Kioto deja de ser vigente. El objetivo de dicho Acuerdo consiste en mantener el incremento de la temperatura media del planeta por debajo de los 2 °C en el año 2100 y fomentar esfuerzos adicionales que permitan limitar dicho incremento a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales (UNFCC, 2015). Alcanzar este objetivo requiere de una labor coordinada a nivel mundial y del desarrollo de nuevas tecnologías capaces de reducir emisiones de CO₂ a la atmósfera. En el año 2018, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) presentó un informe sobre los impactos de un calentamiento global superior a 1,5 °C y la evolución de las emisiones antropogénicas de CO₂ necesaria para limitar el incremento de la temperatura global a 1,5 °C (IPCC, 2018). De acuerdo con las predicciones mostradas por el IPCC en este informe, las emisiones de CO₂ deberían pasar a ser emisiones “negativas” de CO₂ en el año 2050. El concepto emisiones “negativas” hace referencia a la eliminación de la atmósfera de CO₂ previamente emitido.

Actualmente se consideran 7 tecnologías capaces de conseguir emisiones negativas de CO₂, conocidas en inglés como NETS (Negative Emission Technologies) (Fuss et al., 2018) donde dos de ellas involucran el uso de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂.

Las 7 NETS incluyen la aforestación y reforestación, mineralización mejorada (*Enhanced weathering*), fertilización o nutrición oceánica (*Ocean fertilisation*), uso de biochar en suelos, bioenergía con captura y almacenamiento de CO₂ (BECCS, *Bioenergy and Carbon Capture and Storage*), y la captura directa de CO₂ del aire y almacenamiento (DACCS, *Direct Air CO₂ Capture and Storage*).

La implantación de la tecnología DACCS lleva asociada una elevada penalización energética tal como se concluye en el reciente trabajo de [Bui et al. \(2018\)](#), lo que conduce a un coste demasiado elevado para ser factible, entre 200 y 300 \$/tCO₂ ([Fuss et al., 2018](#)), aunque está experimentando un desarrollo muy rápido y se esperan reducciones significativas en el futuro inmediato. Por el contrario, **las tecnologías BECCS se confirman como las únicas capaces de obtener energía y al mismo tiempo alcanzar emisiones negativas de CO₂.**

El concepto BECCS puede incluir una gran variedad de tecnologías energéticas e industriales con diferentes grados de emisiones de CO₂. En el concepto BECCS se unen el uso de bioenergía y la CAUC ([Canadell y Schulze, 2014](#)). El CO₂ liberado durante la transformación de la biomasa es igual al utilizado por ella durante su crecimiento, dando lugar a emisiones neutras en el proceso global. Sin embargo, la captura y almacenamiento del CO₂ producido durante su aprovechamiento conduce a emisiones negativas. También es posible el uso de este CO₂ capturado obtenido a partir de biomasa, dando lugar en ese caso a emisiones neutras de CO₂.

El desarrollo de las tecnologías BECCS presenta ventajas con vistas a la reducción de emisiones de CO₂ a largo plazo. La primera es la posibilidad de implementarse en una gran variedad de procesos, desde centrales térmicas a procesos industriales, plantas de gasificación o biorefinerías. La segunda es que **pueden permitir cumplir los objetivos de reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera en el plazo de tiempo planteado en el Acuerdo de París.** Además, se estima que a finales del presente siglo pueden compensar emisiones de otros sectores que utilizan combustibles fósiles, como puede ser el transporte y más concretamente el utilizado en la aviación ([Creutzig et al., 2015](#)).

A día de hoy, la experiencia acumulada por las tecnologías BECCS a la escala necesaria para la lucha contra el cambio climático es bastante limitada. Todos los grandes proyectos BECCS existentes actualmente se llevan a cabo en procesos de producción de etanol, donde el CO₂ capturado se almacena en formaciones salinas o se utiliza en procesos EOR ([Carbon Sequestration Leadership Forum \[CSLF\], 2018](#)).

La tecnología de bioenergía con captura y almacenamiento de CO₂ o BECCS presenta grandes posibilidades de desarrollo ya que pueden aplicarse a gran variedad de procesos y biocombustibles incluyendo biogás, biolíquidos o biomasa.

Dentro de ellas, la biomasa es la que presenta unas mejores perspectivas de desarrollo y que puede sustituir, en cierta medida, el uso de combustibles fósiles. Se estima que en 2050, la bioenergía puede suministrar alrededor de 3100 TWh de electricidad, lo que supone 7,5% de la generación de electricidad a nivel mundial y a su vez contribuir a la reducción de emisiones de CO₂ en 1,3 Gt/año ([IEA, 2012b](#)). Frente a los combustibles fósiles, **el uso de biomasa tiene la ventaja de ser una fuente renovable de energía y no afectar al balance de carbono global.** Sin embargo, las características intrínsecas de la biomasa pueden condicionar el diseño del proceso BECCS:

- La biomasa posee menor densidad y poder calorífico que el carbón, por lo que su transporte al punto de aprovechamiento puede ser más dificultoso y caro. Esto puede limitar el área geográfica donde la biomasa es aprovechada y, por tanto, la escala de operación del proceso.

- La biomasa contiene altos niveles de humedad, lo que reduce a su vez el poder calorífico y afecta también a su almacenamiento.
- La biomasa posee altos niveles de oxígeno, cloro y metales alcalinos en su composición que pueden dar lugar a problemas de ensuciamiento y corrosión cuando son liberados durante el proceso de conversión de la biomasa.

En España existe alguna experiencia en el desarrollo de dos tecnologías de captura de CO₂ con biomasa, que podrían considerarse como tecnologías BECCS: son los procesos *Calcium Looping* (CaL) y la combustión con transportadores sólidos de oxígeno (*Chemical Looping Combustion*, CLC).

En la planta piloto (300 kW_t) de la central de La Robla (Gas Natural Fenosa), en León, se llevó a cabo la combustión de biomasa en aire a una temperatura baja (de unos 700 °C) en presencia de CaO que captura el CO₂ por carbonatación en el mismo lecho de combustión. Por otro lado, en la planta de combustión con transportadores de oxígeno de 50 kW_t existente en el Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC) se han llevado a cabo recientemente las primeras pruebas de combustión de distintas biomásas utilizando un transportador de oxígeno basado en hierro con resultados satisfactorios.

Análisis DAFO de la situación de la CAUC en España

Asimismo, a modo de conclusiones sobre las que reflexionar, al final del monográfico “Captura de CO₂: tecnologías para cumplir el Acuerdo de París”, se incluye un análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) realizadas mediante un análisis interno y externo. Este tipo de análisis es una herramienta de evaluación muy empleada en el examen del estado de desarrollo de una tecnología y las expectativas de su evolución futura en España.

En el caso de las tecnologías de captura del CO₂, el análisis DAFO muestra las siguientes conclusiones:

Debilidades:

- Falta de tecnólogos nacionales que lideren el proceso de desarrollo de la tecnología.
- Falta de continuidad en el desarrollo de iniciativas que surgen a nivel de investigación, pero no dan el salto a su desarrollo industrial.

Amenazas:

- Falta de apoyo continuado en los presupuestos de I+D.
- Pérdida de liderazgo en el desarrollo de algunas tecnologías por falta de apoyo en su continuidad.

- Desinterés del sector energético en el desarrollo tecnológico acentuado por el previsible cierre de buen número de grupos de carbón.
- Falta de apoyo a nivel europeo comparado con otros países. Pérdida de competitividad.

Fortalezas:

- Experiencia en el diseño, construcción y experimentación de una amplia gama de plantas piloto a tamaño preindustrial abarcando diferentes tecnologías.
- Grupos de investigación líderes en el desarrollo de algunas de las tecnologías más prometedoras.

Oportunidades:

- Las instalaciones de captura, transporte y almacenamiento de CO₂ de la Ciudad de la Energía, CIUDEN, constituyen una oportunidad para el desarrollo de una planta de demostración industrial, que facilitaría el despliegue de estas tecnologías a nivel comercial.
- Disponer en España de la planta piloto pionera a nivel mundial en la captura de CO₂ por carbonatación-calcinación en funcionamiento desde el año 2012 de La Pereda (Asturias).
- Participación en proyectos europeos en consorcio con otras empresas de alto nivel.

CONCLUSIONES

Los ambiciosos objetivos planteados en el Acuerdo de París para evitar que el incremento de la temperatura media global de la Tierra supere los 2 °C (escenario 2DS) con respecto a los niveles preindustriales y promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1,5 °C (escenario B2DS), hacen que sean muy difíciles de conseguir utilizando únicamente las soluciones actualmente planteadas (uso de energía nuclear, energía de carácter renovable, aumento de eficiencias en la producción y uso final, etc.). En dicho contexto, las tecnologías CAUC se consideran como indispensables para la transición hacia un nuevo modelo energético descarbonizado por parte de diferentes organizaciones internacionales del clima y la energía.

Además del uso de tecnologías CAUC en grandes centrales térmicas, el uso de estas tecnologías aplicadas a la industria (siderurgia, cementeras, refinerías, etc.) van a ser cada vez más relevantes en los próximos años. Asimismo, la utilización de recursos energéticos de carácter renovable (biogás, biomasa, residuos orgánicos, etc.), junto con la captura y almacenamiento del CO₂ producido, BECCS, se plantea como la única opción posible capaz de obtener energía y emisiones negativas de CO₂ al mismo tiempo, que permitirá alcanzar los objetivos planteados en el escenario B2DS.

Por tanto, la investigación y desarrollo de tecnologías de captura de CO₂, que permitan abaratar su coste, van a ser cruciales para el desarrollo de los procesos CAUC, y representan una oportunidad muy interesante a nivel nacional.

BIBLIOGRAFIA

- Adánez, J., Abad, A., García-Labiano, F., Gayán, P., de Diego, L.F. (2012). Progress in Chemical-Looping Combustion and Reforming Technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 215-282.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.09.001>
- Bui, M., Adjiman, C.S., Bardow, A., Anthony, E.J., Boston, A., Brown, S., ... (2018). Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy Environmental Science*, 11, 1062-1176.
<https://doi.org/10.1039/c7ee02342a>
- Canadell, J.G. y Schulze, E.D. (2014). Global potential of biospheric carbon management for climate mitigation. *Nature Communications* 5, 5282.
<https://doi.org/10.1038/ncomms6282>
- Carbon Sequestration Leadership Forum CSLF (2018). *Technical Summary of Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS)*.
- Creutzig, F., Ravindranath, N.H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., ... (2015) Bioenergy and climate change mitigation: An assessment. *GCB Bioenergy* 7, 916-944.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>
- Department of Energy/National Energy Technology Laboratory. DOE/NETL. (2010). *Carbon capture and storage RD&D roadmap*.
- European Academies – Science Advisory Council. EASAC (2013). *Carbon capture and storage in Europe*. Policy report 20.
- European Academies – Science Advisory Council. EASAC (2018). *Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets*.
- Fuss, S., Lamb, W.F, Callaghan, M.W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., ... (2018). Negative emissions - Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* 13, 063002.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- Global Carbon Capture and Storage Institute, GCCSI (2011). *The costs of CCS and other low-carbon technologies*.

Global Carbon Capture and Storage Institute, GCCSI (2017). *Global costs of carbon capture and storage 2017 update*. Lauren Irlam.

Higman, C. (2017). *GSTC Syngas Database: 2017 Update*. Gasification & Syngas Technologies Conference Colorado Springs.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2005). *IPCC Special report on carbon dioxide capture and storage*. Prepared by Working Group III of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2018). *Global Warming of 1.5 °C*.

International Energy Agency, IEA (2012a). *Energy Technology Perspectives*.

International Energy Agency, IEA (2012b). *Technology Roadmap: Bioenergy for Heat and Power*.

International Energy Agency, IEA (2013). *CCS Technology Roadmap*.

International Energy Agency, IEA (2017). *Tracking Clean Energy Progress: 2017*.

Plataforma Tecnológica Española del CO₂, PTECO2 (2019). *Captura de CO₂: tecnologías para cumplir el Acuerdo de París*. Disponible en www.pteco2.es

Pohlmann, J., Bram, M., Wilkner, K., Brinkmann, T. (2016). Pilot Scale Separation of CO₂ from Power Plant Flue Gases by Membrane Technology. *International Journal Greenhouse Gas Control* 53, 56–64.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.07.033>

Pöyry Management Consulting (2015). *Potential CCS cost reduction mechanisms*. Final Report Summary. A report to the Committee on Climate Change.

Rubin, E.S., Davidson, J.E., Herzog, H.J. (2015). The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40, 378-400.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.018>

United Nations Framework Convention for Climate Change, UNFCCC (2015). *Paris Agreement*.

Zero Emissions Platform (ZEP) (2011). *The costs of CO₂ capture. Post-demonstration CCS in the EU*.